

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra výrobních strojů a konstruování

# **Multiparametrická diagnostika na pasivační lince se zaměřením na on-line diagnostiku**

## Multiparametric's Diagnostics of Pasivation Line to Aim for On-Line Diagnostics

Student:

Bc. Martin Michalík

Osobní číslo:

MIC0298

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2020

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Michalík**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování

Téma: **Multiparametrická diagnostika na pasivační lince se zaměřením na on-line diagnostiku**  
**Multiparametric's Diagnostics of Pasivation Line to Aim for On-Line Diagnostics**

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce se zabývejte problematikou aplikace on-line diagnostiky na pasivační linku. Rozeberte problematiku týkající se této aplikace, zvolte vhodná místa pro umístění snímačů. Popište přístrojovou techniku a softwarové nastavení pro tuto aplikaci. Proveďte potřebná měření, včetně vyhodnocení naměřených dat.

### V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte potřebná měření.
5. Proveďte konkrétní provozní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.  
Rozsah práce min. 45 stran textu.

### Seznam doporučené odborné literatury:

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6

KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4

BLATA, J. – Juraszek, J. *Metody technické diagnostiky, teorie a praxe. Metody diagnostyki technicznej, teoria i praktyka*. Ostrava: REPRONIS, s.r.o., 2013, 133 stran, ISBN 978-80-248-2997-5

Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

ČSN 20 0065 *Metody měření a hodnocení mechanického kmitání - Mezní hodnoty kmitání*. Praha: Český normalizační institut, červen 1992. 16 s.


*Interní podkladové materiály*

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

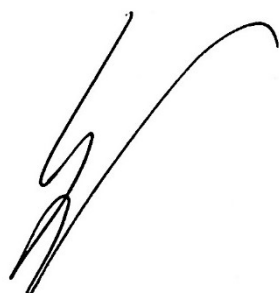
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jiří Fries, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě dne 18.5.2020

.....  
  
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18.5.2020

  
.....  
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Michalík

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Dolany 301, 783 16

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

MICHALÍK, M. *Multiparametrická diagnostika na pasivační lince se zaměřením na on-line diagnostiku: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2020, 74 s. Vedoucí práce: Ing. Blata, J., Ph.D.

Tématem diplomové práce je aplikace metod technické diagnostiky na pasivační linku s využitím online a offline diagnostiky. V úvodní teoretické části této práce je stručně popsána spolupracující firma, nastíněny principy a typy snímačů vibrací a nakonec jsou zde vysvětleny a popsány základní typy závad a jejich projev ve frekvenčním spektru. Druhá část popisuje sledované objekty, jejich provoz, konstrukci a parametry. Praktická část je zaměřená na samotnou realizaci online systému a nastavení parametrizačního softwaru. Závěr této práce je věnován vyhodnocení sledovaných veličin a také zhodnocení celkového stavu monitorovaných strojů.

## **ANNOTATION MASTER THESIS**

MICHALÍK, M. *Multiparametric's Diagnostics of Pasivation Line to Aim for On-Line Diagnostics*: Master thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2020, 74 p. Supervisor: Ing. Blata, J., Ph.D.

The theme of Master thesis is the application of technical diagnostics methods on pasivation line with the use of online and offline diagnostics. In the introduction are briefly described cooperating company, principles and types of accelerometers and in the end are described basic types of defects. The second part describes the monitoring objects, their processes, construction and parameters. The last parts are about the realization of online system, setting of the parametrization software and evaluation of the overall monitored condition of the machines.

# OBSAH

1	ÚVOD .....	11
2	SNÍMAČE VIBRACÍ .....	12
2.1	Piezoelektrický snímač vibrací .....	12
2.2	MEMS piezorezistivní snímače vibrací .....	14
2.3	MEMS kapacitní snímače vibrací .....	15
2.4	MEMS tepelné snímače vibrací .....	17
3	VIBRODIAGNOSTIKA – ZÁKLADNÍ PORUCHY A JEJICH PROJEVY .....	19
3.1	Hmotová nevyváženost .....	19
3.1.1	Silová nevyváženost .....	19
3.1.2	Momentová nevyváženost .....	19
3.1.3	Dynamická nevyváženost .....	20
3.1.4	Nevyváženost převislého rotoru .....	20
3.2	Ohnutý hřídel .....	21
3.3	Nesouosost .....	21
3.3.1	Úhlová nesouosost .....	21
3.3.2	Paralelní nesouosost .....	22
3.3.3	Nesouosé ložisko, nakřivo na hřídeli .....	22
3.4	Mechanické uvolnění .....	23
3.5	Přidírání motoru .....	24
3.6	Valivá ložiska (4 etapy poškození) .....	25
3.6.1	ETAPA 1 .....	25
3.6.2	ETAPA 2 .....	26
3.6.3	ETAPA 3 .....	26
3.6.4	ETAPA 4 .....	27
3.7	Hydraulické a aerodynamické síly .....	27
3.7.1	Průchod lopatek .....	27

3.7.2	Turbulentní proudění .....	28
3.7.3	Kavitace .....	28
4	TERMODIAGNOSTIKA .....	30
4.1	Kontaktní měření .....	30
4.2	Bezkontaktní měření teploty .....	30
4.3	Emisivita .....	31
4.3.1	Kontaktní metoda .....	31
4.3.2	Metoda využívající materiálu s referenční emisivitou .....	32
4.4	Teplota okolí .....	32
4.4.1	Metoda odrazu .....	33
4.4.2	Přímá metoda .....	33
4.5	Způsoby vyhodnocení termovizních měření .....	34
4.5.1	Vyhodnocení kvantitativní .....	34
4.5.2	Vyhodnocení kvalitativní .....	34
5	VÝROBNÍ LINKA SVAŘENCŮ .....	35
5.1	Rozprašovací zařízení pro předběžnou úpravu .....	35
5.2	Sušička zbytkové vody .....	35
6	ODSTŘEDIVÁ ČERPADLA <i>Etachrom B A Etabloc</i> .....	36
6.1.1	Konstrukce a funkce .....	36
6.1.2	Servis a údržba .....	37
7	ČISTIČKA ODPADNÍHO VZDUCHU .....	38
7.1	Radiální ventilátor pro odvod vyčištěného odpadního vzduchu .....	38
7.2	Čištění a údržba .....	39
8	ONLINE A OFFLINE DIAGNOSTIKA .....	40
8.1	Zavedení diagnostického systému .....	40
8.2	Nastavení parametrizačního softwaru VES004 pro vyhodnocovací jednotky .....	41
8.2.1	v-RMS (frequenci domain) .....	43
8.2.2	a-RMS (frequenci domain) .....	45



8.2.3	a-Peak (time domain) .....	45
8.2.4	Others .....	46
9	ZHODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU SLEDOVANÝCH OBJEKTŮ .....	47
9.1	Průmyslové radiální ventilátory .....	49
9.1.1	Radiální ventilátory pro cirkulaci vzduchu v sušícím zařízení .....	50
9.1.2	Radiální ventilátor pro odvod zneutralizovaného vzduchu .....	52
9.1.3	Závěrečné zhodnocení technického stavu .....	53
9.2	Horizontální odstředivá čerpadla .....	55
9.2.1	Horizontální čerpadla 1 a 3 .....	55
9.2.2	Horizontální čerpadla 2 a 4 .....	57
9.2.3	Horizontální čerpadla 5, 6 a 7 .....	58
9.2.4	Závěrečné zhodnocení technického stavu .....	60
10	CELKOVÝ ZÁVĚR .....	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	67
	SEZNAM TABULEK .....	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	70
	SEZNAM GRAFŮ .....	73
	SEZNAM PŘÍLOH .....	74

## Seznam použitých zkratk:

ZNAČKA	NÁZEV	JEDNOTKA
RMS	Efektivní hodnota	
v_RMS	Efektivní hodnota rychlosti vibrací	[mm·s <sup>-1</sup> ]
a_RMS	Efektivní hodnota zrychlení vibrací	[mm·s <sup>-2</sup> ]
d_RMS	Efektivní hodnota výchylky vibrací	[mm]
PEAK	Špičková hodnota	
a_PEAK	Špičková hodnota zrychlení vibrací	[mm·s <sup>-2</sup> ]
FFT	Rychlá Fourierova transformace	
MEMS	MicroElectroMechanical Systems	
a	Zrychlení vibrací	[mm·s <sup>-2</sup> ]
v	Rychlost vibrací	[mm·s <sup>-1</sup> ]
t	Čas	[s]
f	Frekvence	[Hz]
F	Síla	[N]
Q	Průtok	[m <sup>3</sup> /h]
H	Výtlačná výška	[m]
p	Tlak	[Pa]
SF	Segment výrobní linky svařence	
HFD	High frequenci diagnostics	
L	Ložisko	
V	Vertikální směr	
H	Horizontální směr	
A	Axiální směr	
Č	Čerpadlo	
M	Motor	
č.	Číslo	
Max.	Maximální	

# 1 ÚVOD

Cílem této diplomové práce je zavedení diagnostického systému na nově vybudovaném segmentu výrobní linky s názvem SF08. Sledovanými objekty zde budou odstředivá čerpadla a průmyslové radiální ventilátory, jejichž technický stav a provozuschopnost jsou důležitými aspekty pro chod nejen segmentu SF08, ale i pro další navazující segmenty a montážní linky.

Pro objektivní poznání technického stavu a zjištění referenčních hodnot využiji takzvanou multiparametrickou diagnostiku. Jak už název napovídá, budu zde sledovat dva parametry, konkrétně vibrace a povrchovou teplotu. Na základě těchto dvou parametrů zhodnotím technický stav sledovaných objektů a popřípadě navrhnou nápravná opatření.

Pro zajištění provozuschopnosti sledovaných objektů jsem zvolil kombinaci online a offline diagnostiky. U průmyslových ventilátorů, u kterých by pochůzkové měření vibrací bylo velmi obtížně proveditelné, jsem zvolil nepřetržité sledování vibrací za pomoci online systému. U odstředivých čerpadel bude vibrodiagnostika, stejně jako termodiagnostika u všech sledovaných objektů, prováděna formou pochůzkového měření.

Úvodní kapitoly postupně probírají typy a principy dnes používaných akcelerometrů, projev základních poruch ve frekvenčním spektru a také postupy a způsoby vyhodnocení metod termodiagnostiky. Další tři kapitoly slouží k popsání jednotlivých sledovaných objektů, konstrukce a charakteru provozu. První polovina praktické části této práce se zabývá samostatným nastavením parametrizačního softwaru VES004, ve kterém se nastavují například: limitní hodnoty vibrací, filtry, časová a frekvenční okna. Druhá polovina je věnována objektivnímu posouzení celkového stavu sledovaných objektů, vyhodnocení naměřených dat a případnému provedení nápravných opatření.

## 2 SNÍMAČE VIBRACÍ

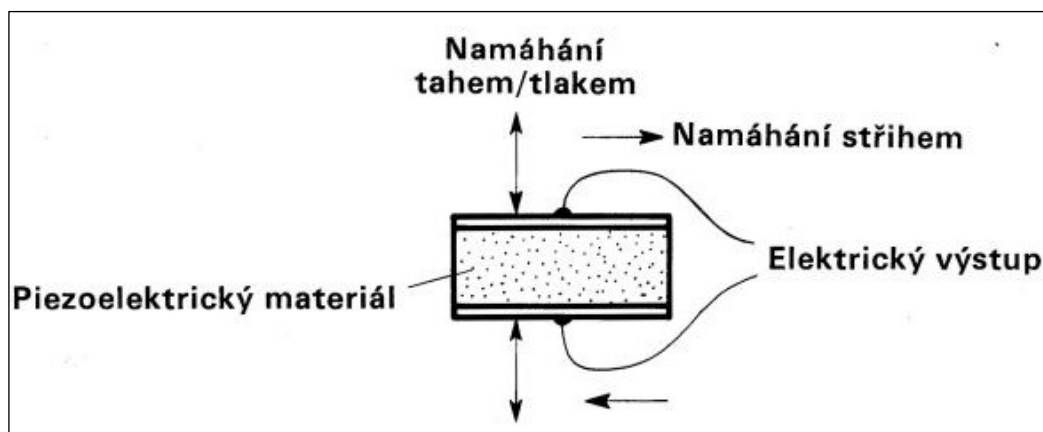
Ve většině případech je k měření vibrací na klasické konstrukci použit snímač, který využívá piezoelektrický jev. Existují ale i snímače které využívají jiné fyzikální principy jako například: tepelné, akustické, rezonanční, optické, servo mechanické, odporové nebo kapacitní. Většina těchto jmenovaných snímačů se používá jen ve speciálních případech, kdy použití piezoelektrických snímačů není vhodné nebo je nelze použít. Důvodem mohou být velké výrobní náklady a složitost konstrukce, oproti konstrukci snímačů na principu piezoelektrického jevu. [1]

### 2.1 Piezoelektrický snímač vibrací

Piezoelektrický snímač zrychlení vibrací, neboli akcelerometr je jedním z nejzákladnějších snímačů vibrací. Má mnoho předností, například: pevnou robustní konstrukci, velkou citlivost, definovanou linearitu, široký pracovní rozsah kmitočtů, vysokou spolehlivost a dlouhodobou stabilitu parametrů. Tyto snímače jsou také označovány jako snímače aktivní, protože generují elektrický náboj, a tudíž většinou nepotřebují napájení, což je další výhoda těchto snímačů. Mezi nevýhody by se daly uvést: nemožnost měřit statické zrychlení nebo velmi malé kmitočty. [2]

Výstupem těchto snímačů je elektrický náboj přímo úměrný velikosti působícího zrychlení, který je však nutno hned převést na signál napětíový. Ihned po vygenerování elektrického náboje dochází ke snižování (vybití) hodnoty náboje a zkreslení měření, a to z důvodu působení vnitřních parazitních svodových odporů a útlumu. [1]

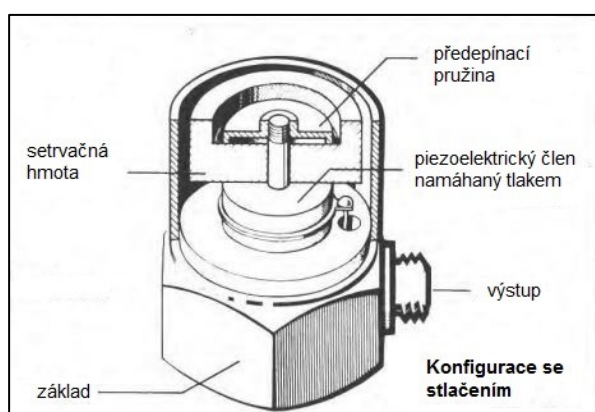
Piezoelektrický snímač zrychlení používá jako základní prvek výřez z piezoelektrického materiálu. Většinou se jedná o uměle polarizovanou piezoelektrickou keramickou hmotu. Při namáhání tohoto materiálu tlakem, tahem nebo stříhem je generován elektrický náboj na stěnách výřezu piezokeramiky. [1]



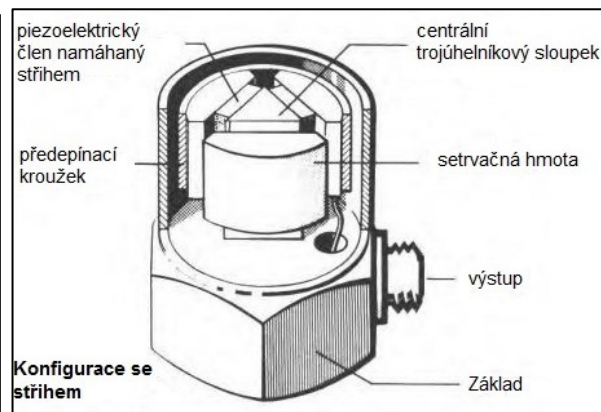
Obr. 1 Způsoby mechanického namáhání piezokeramiky [1]

Při konstrukci piezoelektrických snímačů musí uspořádání piezokeramiky a setrvačné hmoty odpovídat pohybovému zákonu, kde se síla rovná součinu hmotnosti a zrychlení. To znamená, že při kmitavém pohybu snímače musí na piezoelektrické materiálu působit taková síla, která je úměrná zrychlení setrvačné hmoty. K eliminaci uvolnění setrvačné hmoty při kmitání je tato hmota přitažena pružinkou ke piezokeramice. [1]

Snímače takto zkonstruované, jsou použitelné pouze na nižších frekvencích, než je rezonanční frekvence vlastní soustavy, kde vlastní soustavou je myšlena hmota a pružinka. Za těchto daných podmínek je potom výstupní elektrický náboj přímo úměrný zrychlení, které působí na piezokeramiku. Tyto snímače neumožňují použití pro nízké frekvence, neboť při působení konstantní síly nevzniká piezoelektrický jev. Klasický pracovní rozsah se pohybuje od několika Hz až do desítek kHz. Na obrázku 2 a 3 jsou naznačeny dvě nejpoužívanější konstrukce piezoelektrických snímačů. [2]



Obr. 2 Piezoelektrický snímač-konfigurace se střihem [1]



Obr. 3 Piezoelektrický snímač-konfigurace se stlačením [1]

Dánská firma Brüel & Kjær, která se specializuje na výrobu snímačů, jako první využila k výrobě snímačů výbrus čistého krystalu vykazujícího piezoelektrický jev. Výhodou tohoto materiálu byla nízká teplotní citlivost a linearita. Nevýhodou byla nízká citlivost snímače. Z tohoto důvodu se již tyto krystaly v dnešní době pro výrobu snímačů nepoužívají. [1]

V dnešní době jsou k výrobě snímačů používány uměle vytvořené polykrystalické struktury nazvané piezokeramika. Tento uměle vytvořený materiál je nutné „polarizovat“ za pomoci silného elektrického pole. Bez tohoto procesu by materiál zůstal izotropický a nevykazoval by žádné známky piezoelektrického jevu. Takto uměle vytvořená piezokeramika má mnohem větší citlivost, ale je omezená nízkým teplotním rozsahem, kdy pak ztrácí svoji polarizaci. [1]

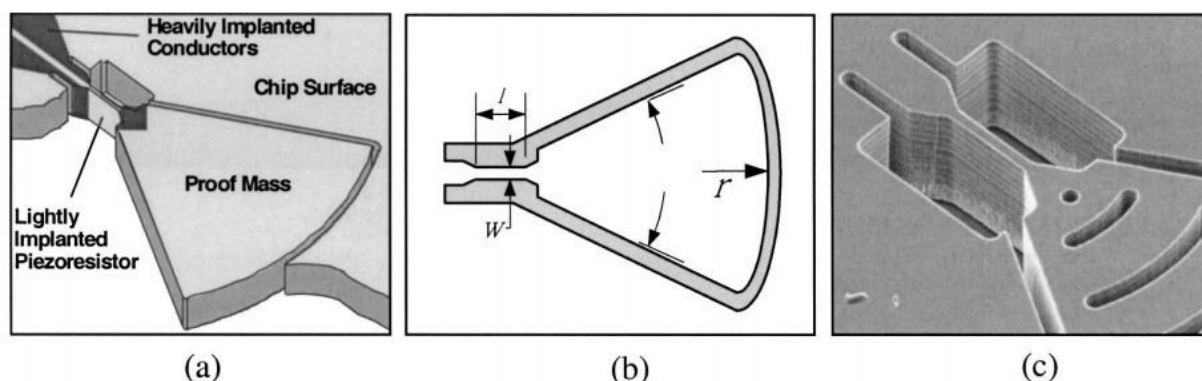
## **2.2 MEMS piezorezistivní snímače vibrací**

Tento typ byl vyráběn jako jeden z prvních MEMS snímačů. V dnešní době jejich používání upadá, z důvodu velké teplotní citlivosti a frekvenčního šumu. Princip spočívá ve změně odporu piezorezistivního materiálu při jeho namáhání v ohybu, tlaku nebo tahu. [3]

Princip snímače spočívá v zavěšení seismické hmoty na tenký a ohebný nosník. Na povrchu tohoto nosníku je nanášena tenká vrstva piezorezistivního materiálu. V důsledku setrvačných sil od působení zrychlení dochází k ohýbání nosníku a tím je vyvíjen tlak na piezorezistivní vrstvu. Vlivem tlaku jsou přeuspořádány atomy v mřížce a tím je způsobena změna odporu. Piezorezistory se zapojují do tzv. Wheatstonova můstku pro dosažení potřebné linearity a citlivosti. Používané zapojení zároveň potlačuje i rušivé vlivy jako například teplotu. Pro převod odporu na elektrický signál je na společném čipu umístěna potřebná elektronika. [3]

V dnešní době se používají jednoduché konstrukce setrvačné hmoty ve tvaru kruhových výsečí, které jsou připojeny ohebnými nosníky k akcelerometru. Rozhodující vlastností je tuhost použitého nosníku. Tuhost určuje maximální měřitelné zrychlení a citlivost akcelerometru. Čím vyšší tuhost, tím větší rozsah zrychlení ale nižší citlivost. Další výhodou této konstrukce je, že zabraňuje nadměrnému odklonu setrvačné hmoty, což by mohlo způsobit nelinearitu a možnost poškození snímače šokem. Důležitým rozdílem

mezi piezoelektrickými a piezorezistivními snímači je, že piezorezistivní snímače dokážou měřit i statické zrychlení. [3]



Obr. 4 (a)- Popis částí piezoelektrického akcelerometru; (b)-Dimenzování snímače; (c)- Snímek piezoelektrického akcelerometru. [3]

Z důvodu velkého šumu při nízkých kmitočtech a velké závislosti citlivosti na teplotě jsou v dnešní době upřednostňovány kapacitní MEMS akcelerometry. Vysoká teplotní citlivost je způsobena vrstvou piezorezistivního materiálu, kde jako u klasických tenzometrů změna teploty způsobuje i změnu elektrického odporu. Mezi nevýhody tohoto akcelerometru lze zahrnout teplotní roztažnost nosníku a změnu tuhosti vlivem teploty. [3]

## 2.3 MEMS kapacitní snímače vibrací

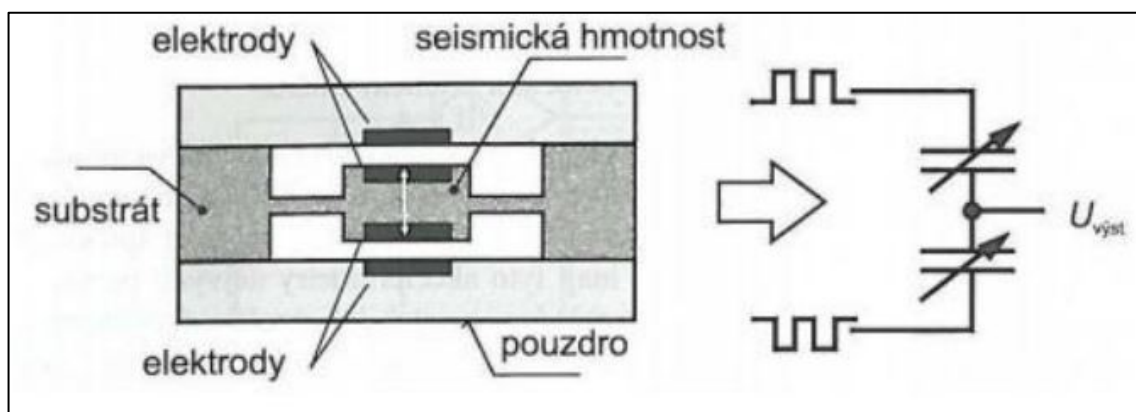
Tento typ snímačů funguje na principu změny kapacity v důsledku vychýlení seismické hmoty. Základem konstrukce snímače jsou pohyblivé elektrody a deskový kondenzátor. Elektrody v tomto případě tvoří zavěšená seismická hmota. Změna kapacity je dána změnou vzdálenosti elektrod, které kmitají vlivem působení zrychlení. Změna kapacity je dále detekována integrovanou elektronikou umístěnou na společném čipu. [2]

Z důvodu nelineární závislosti kapacity kondenzátoru na vzdálenosti elektrod, je nutno pro dosažení částečné linearizace diferenční zapojení elektrod, viz. vztah 1. Princip kapacitního akcelerometru je naznačen na obrázku 5. [2]

$$\text{Vztah pro výpočet kapacity kondenzátoru: } C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (1)$$

Kde:

- $S$  – proměnná plocha kondenzátoru
- $d$  – proměnná vzdálenost elektrod
- $\varepsilon_0$  – permitivita vakua
- $\varepsilon_r$  – relativní permitivita



Obr. 5 Základní uspořádání kapacitního akcelerometru. [7]

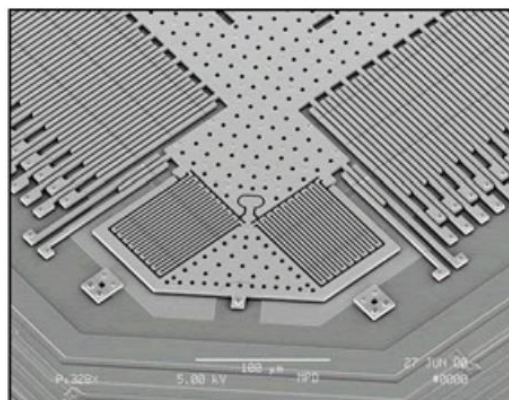
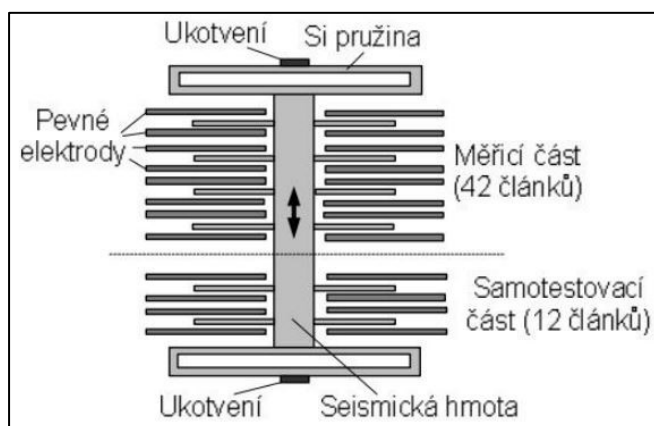
Nejčastější konstrukce těchto kapacitních sensorů je v takzvaném hřebenovém uspořádání, kde jsou paralelně pospojované diferenční kapacitory, kterých může být několik desítek až stovek. Tento typ provedení zajišťuje lepší vlastnosti, jako teplotní stabilitu a citlivost. Nejdůležitější výhodou tohoto provedení jsou možnosti výroby v MEMS provedení. Část těchto diferenčních kapacitorů může sloužit například pro testování akcelerometrů. [2]

Samotné měření pak probíhá v krátkých pulzech za vysokých kmitočtů. Je to z důvodu zamezení ovlivnění naměřených hodnot statickými silami, které by mohli způsobit vychýlení setrvačné hmoty. Měření pak provádí elektronika umístěná na jednom společném křemíkovém čipu. Výstupem akcelerometrů je potom napětí, které odpovídá působícímu zrychlení s určitou citlivostí. [2]

K připevnění setrvačné hmoty kapacitního akcelerometru k jeho pouzdru je použita ohebná pružinka vytvořená z křemíkového substrátu. Celková citlivost a dynamický rozsah snímače je pak dán parametry této pružiny. Ke změně tuhosti a délky pružiny dochází vlivem změny teploty působící na snímač, a to vede ke změně citlivosti akcelerometru.



U piezorezistivních akcelerometrů je tato změna citlivosti mnohem vyšší, proto jsou v současnosti nahrazovány právě kapacitními snímači zrychlení. [2]

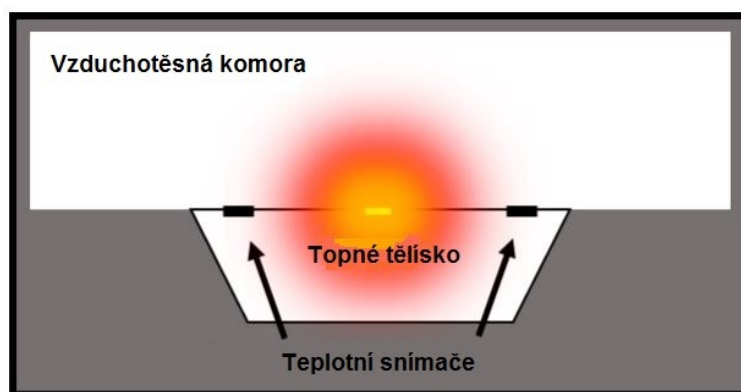


Obr. 6 Hřebenové uspořádání kapacitního akcelerometru. [8]

Obr. 7 Ukázka realizace MEMS kapacitního akcelerometru. [9]

## 2.4 MEMS tepelné snímače vibrací

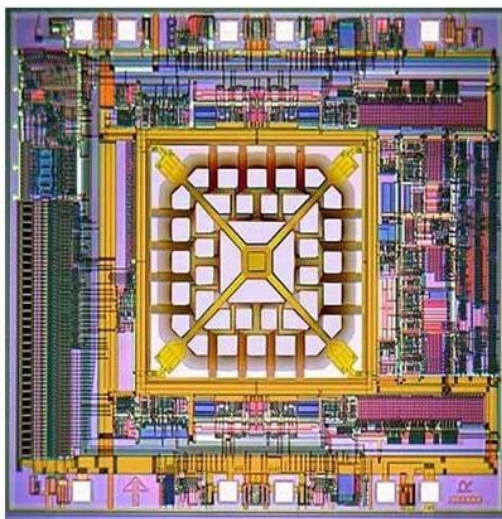
Jsou založeny na fyzikálním principu přenosu tepla v plynu a snímání rozložení teplot. Z pravidla jsou tyto snímače velmi odolné, neboť neobsahují žádnou pohyblivou setrvačnou hmotu upevněnou nosníkem či pružinkou. Setrvačná hmota je nahrazena ohřátým plynem, který se vychyluje ze své rovnovážné polohy vlivem zrychlení. K detekci vychýlení ohřátého plynu jsou použita teplotní čidla. [4]



Obr. 8 Princip tepelného MEMS akcelerometru. [4]

Konstrukce tepelných akcelerometrů je založena na umístění zdroje tepla do středu vzduchotěsné komory, kde se nachází tepelně vodivý plyn ohříváný na konstantní teplotu. Tato komora je realizovaná ve formě drážek vyleptaných do křemíkového substrátu. Okolo těchto drážek jsou umístěny sítě termočlánků pro detekci zahřátého plynu. [4]

Za klidného stavu, kdy na snímač nepůsobí žádné zrychlení, je rozložení tepla v drážkách rovnoměrné. Za působení zrychlení se začne ohřátý plyn dostávat dále do oblastí drážek v protisměru působícího zrychlení. Vyhodnocení zrychlení pak dále probíhá detekcí nerovnoměrného rozložení tepla za pomoci termočlánků a elektronikou integrovanou do společného čipu. [4]



*Obr. 9 Realizace tepelného snímače vibrací firmou MEMSIC [4]*

U tohoto typu snímače je nutná kompenzace vlivu okolní teploty, z důvodu velké teplotní závislosti. Kompenzace je zajištěna elektronikou umístěnou na společném křemíkovém substrátu. Další nevýhodou je nízký frekvenční rozsah akcelerometru. Naopak jako výhoda se dá uvést odolnost a nízké náklady na výrobu. Zajímavostí je, že patent na tento princip snímače zrychlení vibrací má pouze firma MEMSIC. [4]

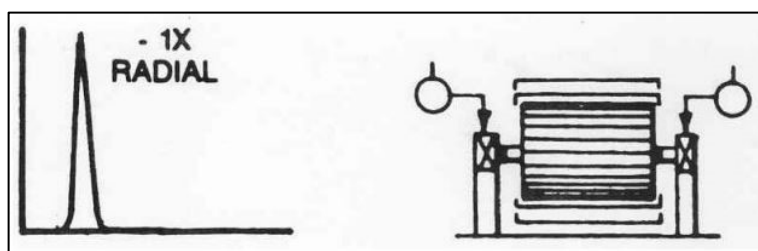
### 3 VIBRODIAGNOSTIKA – základní poruchy a jejich projevy ve frekvenčním spektru

#### 3.1 Hmotová nevyváženost

Nevyváženost je způsobena hmotou, která je nesouměrná s osou rotace a vzniká už při samotné výrobě. Tato nevyváha má za následek vznik mechanického kmitání, což způsobuje velké namáhání stroje. Je to jeden z nejběžnějších důvodů vzniku vibrací a snižování životnosti samotného stroje. Hodnoty vibrací způsobené nevyváhou jsou výrazně závislé na otáčkách stroje, resp. hodnota celkových vibrací stoupá s kvadrátem otáček. To znamená, že když se otáčky zdvojnásobí, zvětší se hodnota vibrací na čtyřnásobek. [5]

##### 3.1.1 Silová nevyváženost

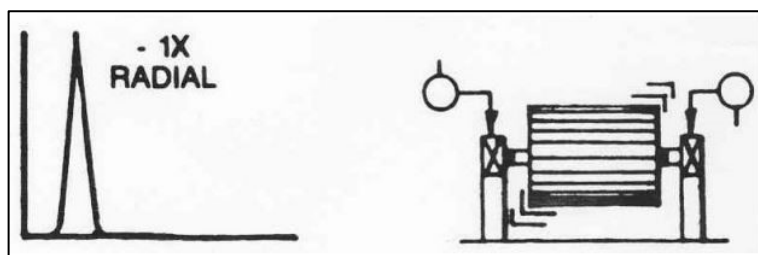
Silová nevyváženost neboli posunuté těžiště se projevuje stejnou fází a je ustálená. Ve spektru je vždy přítomna na prvním násobku otáčkové frekvence a je dominantní. Lze ji korigovat umístěním pouze jednoho vyvažovacího korekčního závaží v jedné rovině. Rozdíl fází bývá nulový jak v horizontálním směru, tak i ve vertikálním. Dále, přibližně 90° rozdíl fází mezi horizontálními a vertikálními vibracemi se obvykle objeví na každém ložisku nevyváženého rotoru ( $\pm 30^\circ$ ). [5]



Obr. 10 Silová nevyváženost [5]

##### 3.1.2 Momentová nevyváženost

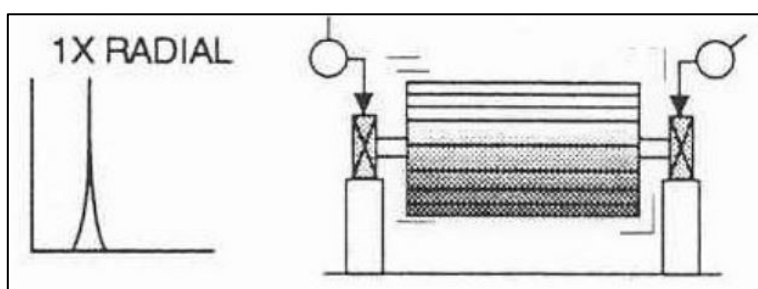
Momentová nevyváženost má na stejném hřídeli vždy za následek pohyb v protifázi (tzn. o  $180^\circ$  proti sobě na stejné komponentě). I zde je vždy přítomna složka prvního násobku otáčkové frekvence a je ve spektru dominantní. Může způsobit vysoké axiální vibrace spolu s radiálními. Ke korekci je nutno umístit vyvažovací závaží alespoň do dvou rovin. Rozdíl fáze je přibližně  $180^\circ$  mezi horizontálními směry na vnějším a vnitřním ložisku a také mezi vertikálními směry na těchto ložiscích. [5]



Obr. 11 Momentová nevyváženost [5]

### 3.1.3 Dynamická nevyváženost

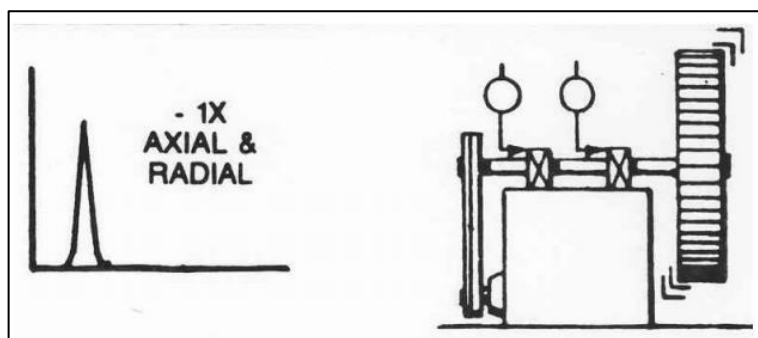
Dynamická nevyváženost neboli obecná nevyváženost, je nejčastěji se objevujícím typem nevyváhy. Je kombinací silové a momentové nevyváhy. Ve spektru se stejně jako předchozí druhy nevyváhy objevuje na prvním násobku otáčkové frekvence a k její korekci je potřeba dvou rovin. Fázový rozdíl mezi horizontálními vibracemi na vnitřním a vnějším ložisku se zde může pohybovat od  $0^\circ$  do  $180^\circ$ . Avšak rozdíl fází v horizontálním směru má souhlasit s rozdílem fází ve vertikálním směru, při porovnání měření na vnějším a vnitřním ložisku ( $\pm 30^\circ$ ). [5]



Obr. 12 Dynamická nevyváženost [5]

### 3.1.4 Nevyváženost převislého rotoru

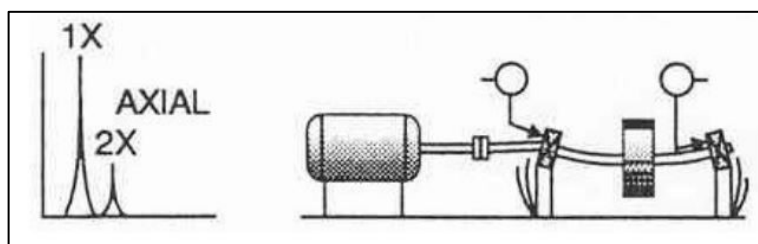
Tento druh nevyváhy se projevuje vysokými vibracemi na první otáčkové frekvenci v axiálním i v radiálním směru. V axiálním směru mají hodnoty tendenci být ve fázi, zatímco odečet fáze pro radiální směry může být neustálený. Většinou ale rozdíl fází v horizontálním směru souhlasí s rozdílem fází ve vertikálním směru ( $\pm 30^\circ$ ). U převislých rotorů se objevuje jak silová, tak i momentová nevyváha. Z tohoto důvodu je nutné opět umístit korekční závaží nejméně ve dvou rovinách. [5]



Obr. 13 Nevyváženost převísleho rotoru [5]

## 3.2 Ohnutý hřídel

Ohnutý hřídel způsobuje velké axiální vibrace, které mají tendenci být v protifázi. Největší vibrace se objeví na prvním násobku otáčkové frekvence, pokud je hřídel ohnutá uprostřed. Na druhém násobku otáčkové frekvence se projeví vibrace, pokud je hřídel ohnuta blízko spojky. [5]

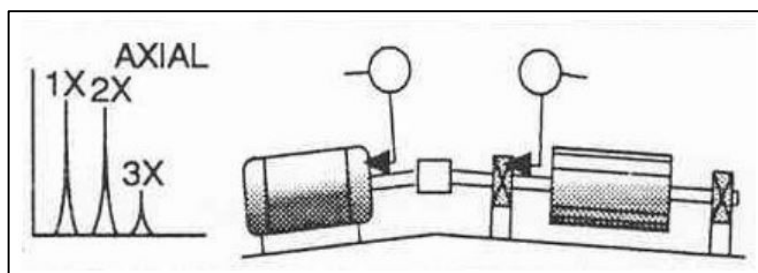


Obr. 14 Ohnutý hřídel [5]

## 3.3 Nesouosost

### 3.3.1 Úhlová nesouosost

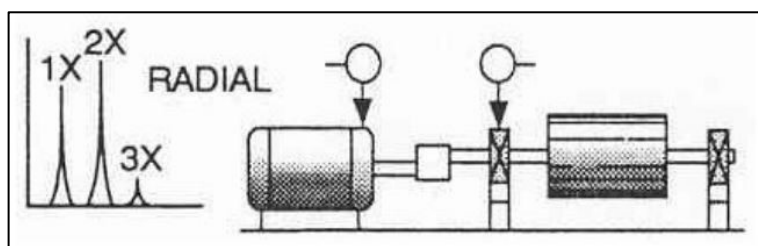
Tento typ nesouososti se projevuje velkými vibracemi v axiálním směru a je v protifázi přes spojku. Typickým projevem ve frekvenčním spektru je dominantní první a zároveň druhý násobek otáčkové frekvence. Není obvyklé, pokud dominuje pouze jedna z prvních tří násobků otáčkové frekvence. Tyto symptomy by mohli indikovat i existenci problému se spojkou. Výrazná úhlová nesouosost může budít mnoho harmonických násobků frekvence otáčení. Rozdílem od mechanického uvolnění, které se projevuje také ve frekvenčním spektru řadou harmonických násobků je, že tyto vícenásobné harmonické složky nemají zvýšenou úroveň prahu šumu ve spektrech. [5]



Obr. 15 Úhlová nesouosost [5]

### 3.3.2 Paralelní nesouosost

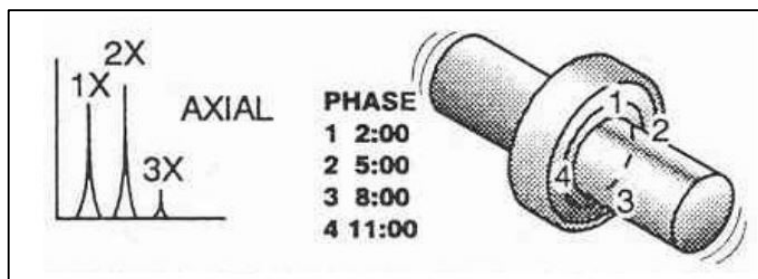
Takto vzniklá nesouosost má velice podobné příznaky jako už zmíněná úhlová nesouosost. Rozdílem je projev vibrací v radiálním směru, které jsou přes spojku v protifázi, tzn. o  $180^\circ$  posunuté. Zde bývá druhý násobek otáčkové frekvence často větší než násobek první. Velikost druhého násobku vůči prvnímu je dán typem a konstrukcí spojky. Při výrazné paralelní nebo úhlové nesouososti, může generovat amplitudové špičky na čtvrtém až osmém násobku otáčkové frekvence nebo řadu dalších násobků, jako je to například u mechanického uvolnění. [5]



Obr. 16 Paralelní nesouosost [5]

### 3.3.3 Nesouosé ložisko, nakřivo na hřídeli

Zde ložisko generuje významné axiální vibrace. Působí kroutivý pohyb, u kterého je fázový rozdíl mezi vibracemi po obou stranách přibližně  $180^\circ$  při měření v axiálním směru na stejném ložiskovém domku. Jediným nápravným opatřením je demontáž ložiska a zpětná správná montáž, pokusy ustavit spojku nebo vyvažovat rotor stav nezlepší. [5]



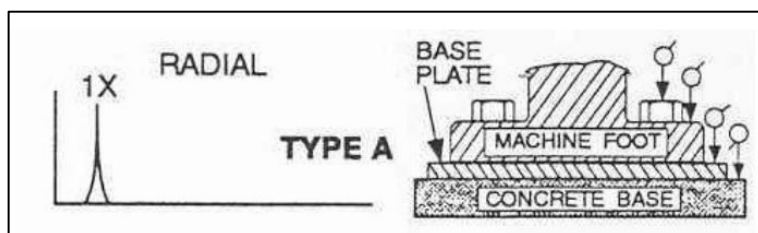
Obr. 17 Nesouosé ložisko [5]



### 3.4 Mechanické uvolnění

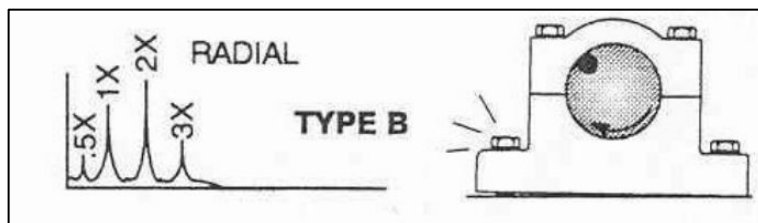
Zde je mechanické uvolnění rozděleno typově do tří skupin: **A**, **B** a **C**.

**Typ A** je způsoben strukturním uvolněním, nebo měkkostí patek stroje, základového rámu nebo základu. Dále také může být způsoben zhoršením stavu zálivky, uvolnění základových šroubů v základu, deformací základového rámu nebo základu (to je tzv. měkká patka). Zde může analýza fáze odhalit fázový rozdíl  $90^\circ$  až  $180^\circ$  mezi vertikálním měřením na šroubu, patce stroje, základové desce nebo samotném základu. [5]



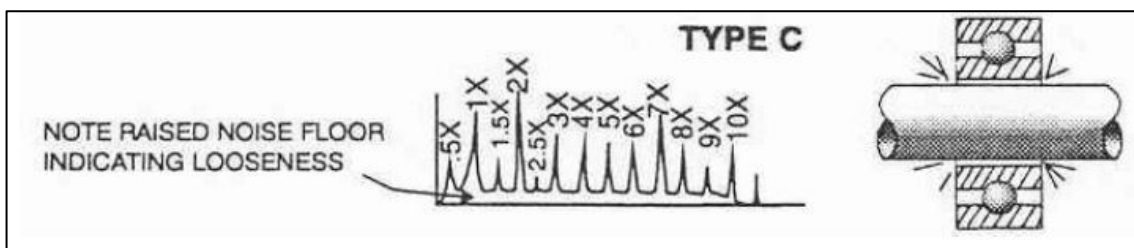
Obr. 18 Mechanické uvolnění, typ A, [5]

**Typ B** je obvykle zapříčiněn uvolněním šroubů ložiskového stojanu, trhlinami v konstrukci rámu nebo v ložiskovém stojanu. [5]



Obr. 19 Mechanické uvolnění, typ B, [5]

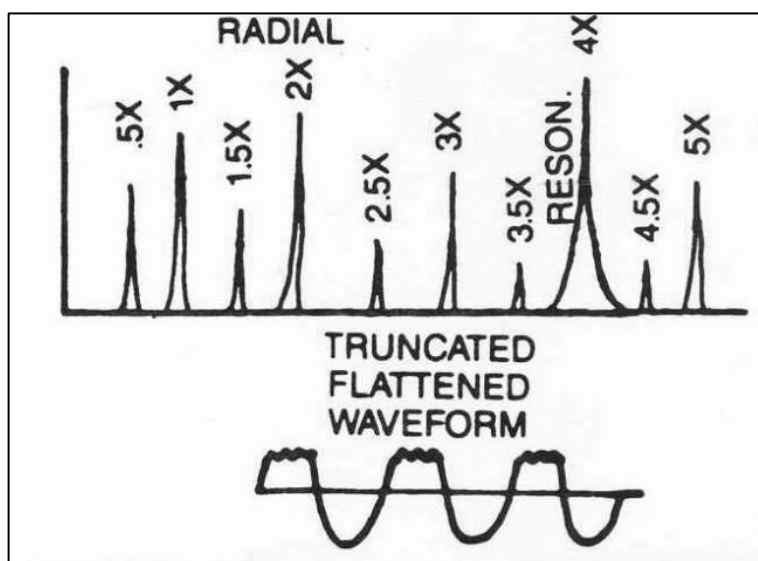
**Typ C** je normálně generován nesprávným lícováním mezi komponentami, což má za následek nelineární odezvu volných částí na dynamické síly od rotoru. Tento typ se prezentuje ořezanou časovou vlnou a zvýšeným prahem šumu ve spektru. Často bývá tento typ způsoben uvolněním pouzdra ložiska ve víku, volným a protáčečím se ložiskem na hřídeli, nadměrnou vůlí v kluzném nebo valivém ložisku, volným oběžným kolem na hřídeli atd. Zde je fáze často neustálená a může se silně měnit od jednoho měření ke druhému. Mechanické uvolnění může také způsobit subharmonické násobky v jedné polovině nebo v jedné třetině otáček. [5]



Obr. 20 Mechanické uvolnění, typ C, [5]

### 3.5 Přidírání motoru

Tato závada se ve frekvenčním spektru projevuje podobně jako mechanické uvolnění. Zde dochází ke kontaktu rotorových a statorových částí, a to může být buď částečné nebo po celou otáčku hřídele. Často generuje řadu frekvencí a obvykle budí jednu nebo několik rezonancí. Jsou zde přítomny i subharmonické složky ve zlomcích otáčkové frekvence, které jsou závislé na velikosti vlastních frekvencí rotoru. Přidírání rotoru může být velmi závažné a může mít krátké trvání, pokud je způsobeno stykem hřídele s kompozicí v ložisku. [5]



Obr. 21 Přidírání rotoru [5]



### 3.6 Valivá ložiska (4 etapy poškození)

Vzorce pro výpočet poruchových frekvencí valivých ložisek:

$$BPFI = \frac{N_b}{2} \left( 1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \cdot RPM \qquad BPFO = \frac{N_b}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \cdot RPM \quad (3)$$

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left[ 1 - \left( \frac{B_d}{P_d} \right)^2 (\cos \beta)^2 \right] \cdot RPM \qquad FTF = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \cdot RPM \quad (4)$$

**BPFI** = poškození vnitřního kroužku

**BPFO** = poškození vnějšího kroužku

**BSF** = poškození valivých elementů

**FTF** = poškození klece

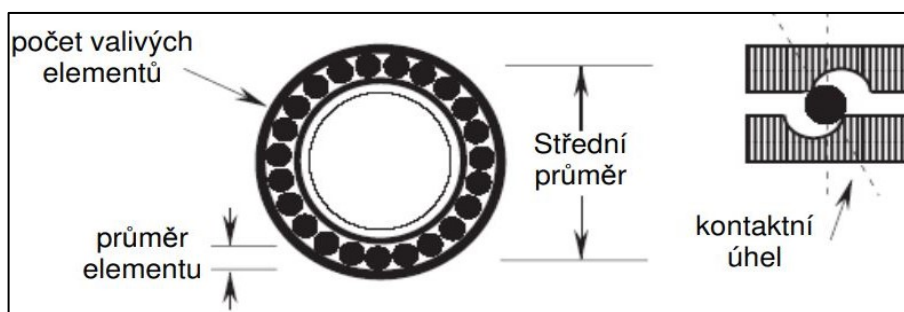
$P_d$  = střední průměr

$B_d$  = průměr valivého elementu

$RPM$  = otáčky hřídele [1/min]

$N_b$  = počet valivých elementů

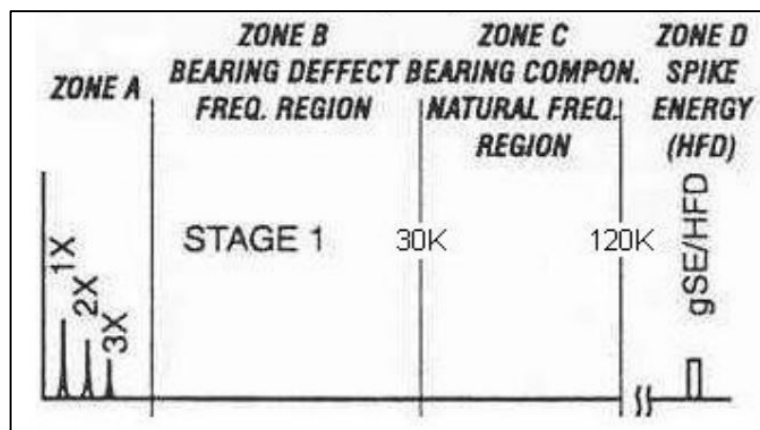
$\beta$  = kontaktní úhel



Obr. 22 Znáznornění rozměrů použitých v rovnicích pro výpočet poruchových frekvencí valivých ložisek [5]

#### 3.6.1 ETAPA 1

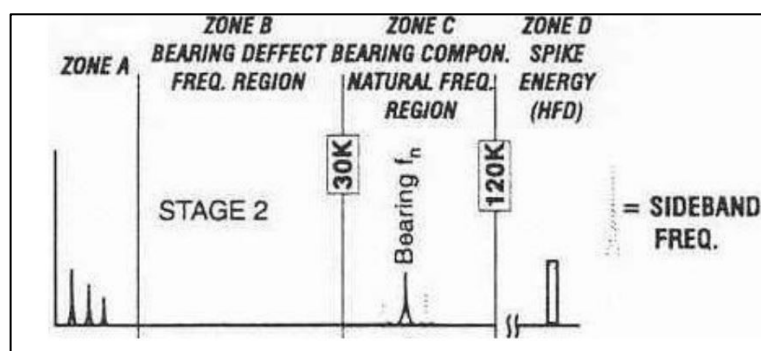
První náznaky poškození ložiska se objevují v ultrazvukovém frekvenčním pásmu od 250 kHz do 350 kHz. Dále, když se opotřebení zvětšuje, frekvence klesá asi na 20 kHz až 60 kHz. K hodnocení frekvencí v tomto pásmu jsou využívány metody „Spike Energy“ [gSE], HFD [g] a „Shock pulse“ [dB]. Například „Spike Energy“ se v 1. etapě nejprve objeví s hodnotou cca 0,25 gSE (skutečná hodnota je vázána na místo měření a na otáčkové frekvenci stroje). [5]



Obr. 23 Průběh poškození valivého ložiska-ETAPA\_1[5]

### 3.6.2 ETAPA 2

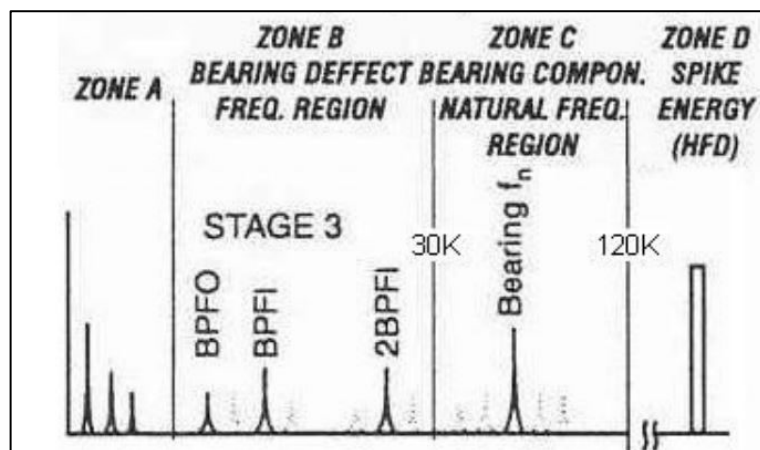
Malé vady v ložisku začínají vyvolávat vlastní frekvence komponent ložiska, které jsou hlavně v oblasti 500 Hz až 2 kHz. Tyto rezonance mohou být zároveň rezonancemi nosných částí ložiska. Na konci 2. etapy se objevují postranní pásma kolem rezonanční špičky (nad a pod). Celková „Spike Energy“ narůstá (např. z 0,25 na 0,5 gSE). [5]



Obr. 24 Průběh poškození valivého ložiska-ETAPA\_2 [5]

### 3.6.3 ETAPA 3

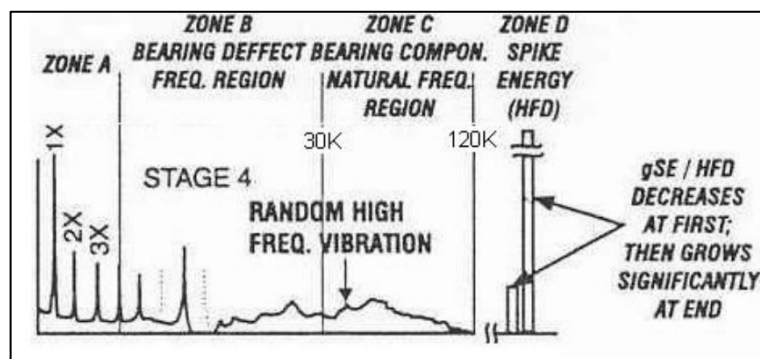
Zde se už objevují poruchové frekvence jednotlivých komponent ložiska a jejich násobky. Při narůstajícím opotřebení se objevují další harmonické násobky frekvencí ložiskových závad a dále také narůstá počet postranních pásem, která se objevují jak u samotných vlastních frekvencí závad, tak i u jejich harmonických násobků. Celková hodnota „Spike Energy“ pak dále roste (např. z 0,5 na 1 a více gSE). V této etapě bývá opotřebení už zcela viditelné. Demodulovaná obálová spektra vysokých frekvencí napomáhají potvrdit etapu 3. V tomto stádiu je zcela nezbytné danou situaci řešit a ložisko vyměnit za nové. [5]



Obr. 25 Průběh poškození valivého ložiska-ETAPA\_3, [5]

### 3.6.4 ETAPA 4

Zde se nachází konec životnosti ložiska a v této etapě je už ovlivňována i amplituda otáčkové složky. Ta roste a spolu s ní i řada harmonických násobků této otáčkové frekvence. Samotné frekvence ložiskových závad a vlastní frekvence komponent ložiska začínají „mizet“ a jsou nahrazeny náhodným širokopásmovým vysokofrekvenčním „prahovým šumem“. Těsně před poruchou je obvyklé, že se hodnoty „Spike Energy“ a HFD prudce zvýší. [5]



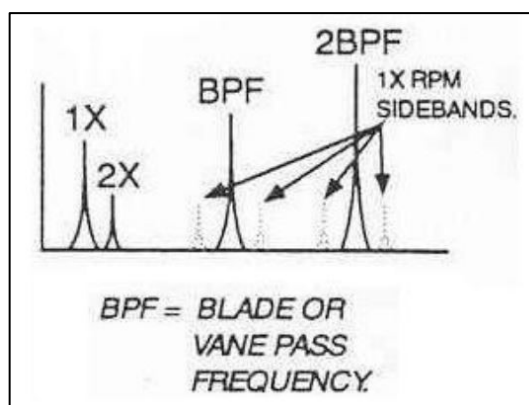
Obr. 26 Průběh poškození valivého ložiska-ETAPA\_4 [5]

## 3.7 Hydraulické a aerodynamické síly

### 3.7.1 Průchod lopatek

Frekvence od průchodu lopatek (blade pass frequenci – BPF, často nesprávně označována jako lopatková frekvence), se určí jako součin počtu lopatek a hodnoty frekvence otáčení. Tato frekvence je vždy přítomna u ventilátorů, čerpadel a kompresorů a za normálních podmínek nepředstavuje problém. U čerpadel se na této frekvenci může

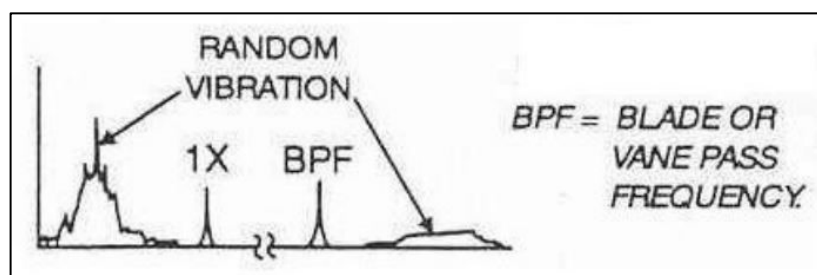
objevovat velká amplituda a její harmonické násobky. To ve většině případů značí nerovnoměrnou mezeru mezi rotujícími lopatkami a statorovým difuzorem. Někdy se tato frekvence, nebo její harmonické násobky, může potkat se systémovou vlastní frekvencí a způsobit tak vysoké vibrace. Dále může vysoká amplituda na této frekvenci znamenat zadření kroužku oběžného kola na hřídeli, povolení svarů lopatek na oběžném kole, nebo také pokud existují překážky které narušují proudění kapaliny v důsledku špatného nastavení tlumičů. [5]



Obr. 27 Spektrum se znázorněnou frekvencí od průchodu lopatek [5]

### 3.7.2 Turbulentní proudění

Nejčastěji se tento jev vyskytuje u dmychadel v důsledku odchylek tlaku nebo rychlosti při průchodu vzduchu ventilátorem. Turbulenci způsobuje narušení proudu, které způsobuje náhodné, širokopásmové vibrace. V klasickém případě se tyto širokopásmové vibrace objevují v rozmezí 50 až 2000 cyklů za minutu. Nadměrná turbulence pak může vyvolat i vysokofrekvenční vibrace. [5]

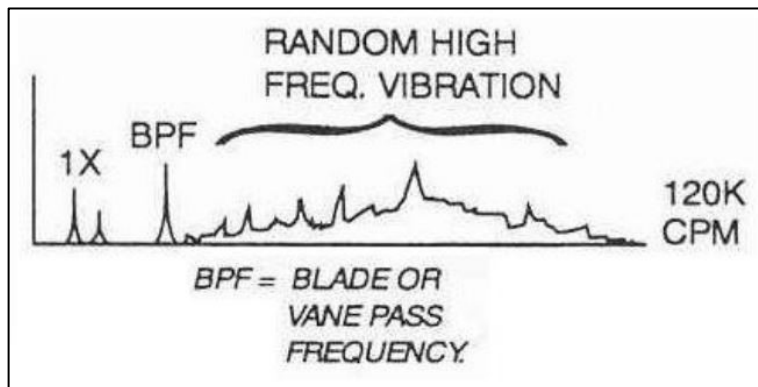


Obr. 28 Turbulentní proudění [5]

### 3.7.3 Kavítace

Projevem kavítace je náhodná širokopásmová energie s vyššími frekvencemi. Tato energie je někdy superponována na harmonické násobky frekvence od průchodu lopatek.

Příčinou kavitace bývá často nedostatečný tlak v sání a mnohdy má destruktivní účinky na vnitřní části čerpadla, pokud není včas odstraněna. Zejména pak oběžné kolo a lopatky jsou vystavovány erozi. Zvukový projev kavitačního jevu je podobný zvuku sypání šterku do čerpadla. [5]



*Obr. 29 Kavitační jev [5]*

## 4 TERMODIAGNOSTIKA

V mnoha oblastech a aplikacích se můžeme setkat s měřením a vyhodnocováním teploty, například ve strojírenském, stavebním, automobilovém hutním a potravinářském průmyslu. K určení technického stavu termodiagnostika využívá sledování teploty nebo také rozboru teplotních obrazců – termovizní snímky. [10]

Teplota určuje stav termodynamické rovnováhy a je to stavová veličina. Teplota patří do skupiny veličin, u kterých je nemožné měřit je přímo, ale je k tomu zapotřebí jiných fyzikálních veličin. Proto se tedy měření teploty označuje jako měření nepřímé a dělí se na měření kontaktní a bezkontaktní. [10]

### 4.1 Kontaktní měření

Z názvu podkapitoly je zřejmé, že měření teploty se provádí kontaktně za pomoci kontaktních teploměrů. Ty se pak dále dělí podle fyzikálního principu funkce na dilatační, odporové, polovodičové, termoelektrické a indikátory teploty. U této metody lze dosáhnout velmi vysoké přesnosti. [10]

### 4.2 Bezkontaktní měření teploty

Z důvodu rozvoje a dostupnosti infračervených termokamer se použití metody bezkontaktního měření teploty výrazně rozšířilo a našlo uplatnění v mnoha oborech. Tato metoda má spoustu výhod, ale i nevýhod. [10]

#### Výhody bezdotykového měření teploty:

- Minimální vliv měřicí techniky na měřený objekt.
- Měření a vyhodnocení teploty na rotujících nebo pohybujících se objektech.
- Měření teploty z bezpečné vzdálenosti, zvláště u elektrických zařízení.
- Možnost měření velmi rychlých změn teploty.
- Možnost měřit a vyhodnocovat teploty celých povrchů těles.

### **Nevýhody bezdotykového měření teploty:**

- Výrazné ovlivnění změřené teploty při špatném zadání emisivity.
- Výrazné ovlivnění změřené teploty při špatné znalosti a zadání okolních vlivů.

## **4.3 Emisivita**

Emisivita vyjadřuje schopnost tělesa vyzařovat teplo ve formě tepelného záření. Je to poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Čím menší emisivita, tím méně energie je těleso schopno za dané teploty vyzařit. Dále pak rozlišujeme černá a šedá tělesa a selektivní zářiče. Emisivita může nabývat hodnot od 1 do 0. Emisivita běžných materiálů se pohybuje v rozmezí od 0,1 do 0,95. Pro určení této hodnoty se dají použít tři metody: stanovení emisivity tabulkou, kontaktní metodou a metodou využívající materiálu s referenční emisivitou. [10]

### **4.3.1 Kontaktní metoda**

Zjednodušený postup dle normy ČSN ISO 18434-1:

- a) Termokamera se umístí do požadovaného místa a vzdálenosti od objektu, který je předmětem měření.
- b) Změří a vykompenzuje se odražená zdánlivá teplota od objektu.
- c) Termokamera se zaměří a dobře zaostří na měřený objekt. Pokud je to možné, tak se zastaví obraz.
- d) Využije se vhodná funkce kamery a stanoví se teplota měřeného bodu nebo oblasti.
- e) Pomocí kontaktního teploměru se změří teplota v bodě nebo oblasti, která byla stanovena za využití předchozích měřících funkcí kamery.
- f) Bez pohnutí s termokamerou se mění nastavení hodnoty emisivity v termokameře tak, aby teplota vyhodnocená touto kamerou byla stejná jako teplota změřená kontaktním způsobem. Takto určená hodnota emisivity je emisivita měřeného objektu při této teplotě a ve vlnovém pásmu použité termokamery.
- g) Emisivita se kompenzuje vložení změřené hodnoty emisivity do vnitřního software termokamery.

### 4.3.2 Metoda využívající materiálu s referenční emisivitou

Zjednodušený postup dle normy ČSN ISO 18434-1:

- a) Termokamera se umístí do požadovaného místa a vzdálenosti od objektu, který se má měřit. Termokamera se zaměří a zaostří na měřený objekt.
- b) Změří a vykompenzuje se odražená zdánlivá teplota od objektu.
- c) Na povrch, který bude měřen, se do blízkosti měřeného místa nanese referenční materiál se známou emisivitou.
- d) Do softwaru Termokamery se zadá hodnota emisivity referenčního materiálu.
- e) Termokamera se zaměří a zaostří na referenční materiál na povrch objektu, je třeba počkat dostatečně dlouho na ustálení teploty, zastaví se obraz a změří a zaznamená se vyhodnocená teplota.
- f) Termokamera se zaměří a zaostří na povrch měřeného objektu v bezprostřední blízkosti referenčního materiálu. Zastaví se obraz a zaznamená se vyhodnocená teplota.
- g) Při zastaveném obrazu se mění hodnota emisivity tak dlouho, až bude mít změřená teplota stejnou hodnotu, jako byla teplota na referenčním materiálu. Takto zjištěná hodnota emisivity je emisivita objektu při této teplotě, která byla změřena při použití kamery s daným vlnovým pásmem.
- h) Emisivita se kompenzuje vložením změřené hodnoty emisivity do vnitřního softwaru termokamery.

## 4.4 Teplota okolí

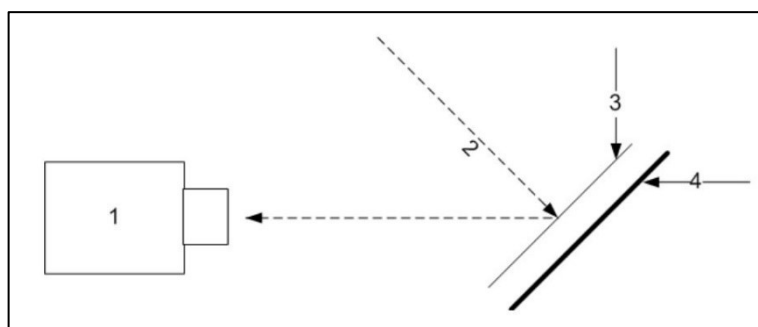
Teplota okolí se určuje za účelem kompenzace vyzářené energie z okolí, která by mohla dopadat na měřený objekt a ovlivnit tak výsledky měření. „Odražená zdánlivá teplota“ je termín, který se nesprávně používá (teplota se nemůže odrážet) k vyjádření vlivu dopadající energie. Se snižující se emisivitou tento vliv stoupá, protože měřený objekt více odráží infračervené záření dopadající z okolí a výsledné měření je značně závislé na zadání správných hodnot emisivity a teploty okolí. Pro určení odražené zdánlivé teploty se používají dvě metody: metoda odrazu a přímá metoda. [10]



#### 4.4.1 Metoda odrazu

Zjednodušený postup dle normy ČSN ISO 18434-1:

- Na termokameře se nastaví emisivita na hodnotu 1 a vzdálenost na 0.
- Termokamera se umístí do požadovaného místa a vzdálenosti od objektu, který se má měřit. Termokamera se zaměří na měřený objekt.
- Reflektor se umístí do požadovaného místa a vzdálenosti od objektu, který má být měřen.
- Bez změny pozice se termokamerou změří odražená zdánlivá teplota reflektoru. Tato zjištěná teplota je v podstatě tou hledanou od objektu se odrážející zdánlivou teplotou.
- Odražená zdánlivá teplota se kompenzuje vložení hodnoty odražené zdánlivé teploty do vnitřního software termokamery.

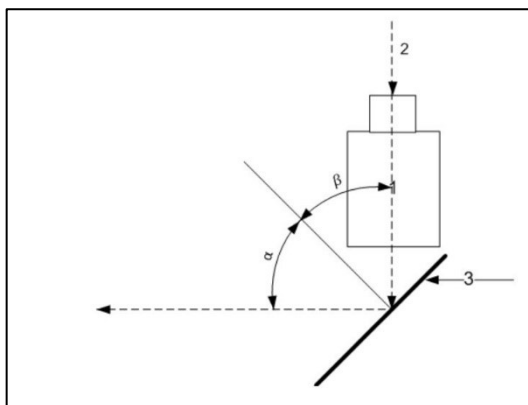


Obr. 30 Princip metody odrazu; 1 – Termokamera, 2 – Zdroj tepla, 3 – Reflektor, 4 – Měřený objekt [20]

#### 4.4.2 Přímá metoda

Zjednodušený postup dle normy ČSN ISO 18434-1:

- Na termokameře se nastaví emisivita na hodnotu 1.
- Termokamera se umístí do požadovaného místa a vzdálenosti od objektu, který se má měřit. Odhadne se úhel odrazu  $\alpha$  a úhel dopadu  $\beta$  při zobrazení objektu termokamerou z místa jejího umístění.
- Termokamera se umístí před měřený objekt tak, aby směřovala na zdroj odrážejícího se záření a byla s objektem v úhlu, který odpovídá úhlu odrazu  $\alpha$ .
- Pomocí termokamery se změří průměrná zdánlivá teplota zdroje. Využije se dostupných funkcí kamery pro určení průměrné teploty oblasti.
- Odražená zdánlivá teplota se kompenzuje vložení hodnoty odražené zdánlivé teploty do vnitřního software termokamery.



Obr. 31 Princip přímé metody; 1 – termokamera, 2 – zdroj tepla, který objekt odráží do kamery, 3 – měřený

objekt,  $\alpha$  úhel odrazu,  $\beta$  úhel dopadu,  $\alpha = \beta$  [20]

## 4.5 Způsoby vyhodnocení termovizních měření

K vyhodnocení termovizních měření se používá vyhodnocení srovnávací kvantitativní nebo srovnávací kvalitativní. [10]

### 4.5.1 Vyhodnocení kvantitativní

Zde se využívá stanovení teploty k posouzení technického stavu sledovaného objektu. V praxi bývá velmi obtížné určit správnou hodnotu teploty a většinou je naměřená teplota s nějakou odchylkou neboli nepřesností. Pro tuto metodu je nutné stanovit správné hodnoty emisivity, odražené zdánlivé teploty a vlivy okolí. [10]

### 4.5.2 Vyhodnocení kvalitativní

Tato metoda využívá k vyhodnocení technického stavu sledovaného objektu vyhodnocování a porovnávání termovizních snímků, teplotních map a obrazců mezi sebou. U této metody se nestanovuje přesná teplota, ale pouze k vyhodnocení teplotních obrazců. Z tohoto důvodu není potřeba určovat emisivitu ani zdánlivě odraženou teplotu. Nejdůležitější je zde zaostření měřeného objektu. Tato metoda se používá tam, kde se měří na stejných zařízeních pracující za stejných podmínek. Pak je možné určit technický stav objektu za pomoci srovnávání jednotlivých snímků zařízení. Důležité je si uvědomit že touto metodou se dá zjistit porucha, ale ne její stupeň závažnosti. [10]

## 5 VÝROBNÍ LINKA SVAŘENCŮ

Celá tato výrobní linka se skládá z několika segmentů včetně plně automatizovaného regálového skladu. V prvním segmentu této výrobní linky probíhá ohýbání a svařování materiálu. Dále následuje švové svařování, expandování, mytí a sušení, dodatečné opracování, bodové svařování vnitřních dílů, pasivace, natavování izolace, klinčování, bodové svařování vnějších dílů a paletování. [11]

### 5.1 Rozprašovací zařízení pro předběžnou úpravu

Zařízení pro předběžnou úpravu je dimenzováno jako průchozí rozprašovací zařízení. Objekty jsou poprašovány ze všech stran, tzn. shora, zdola a zboku. Držáky trysek při tom zůstávají na místě, zatímco kusy s dopravním systémem projíždějí jednotlivými zónami. Předběžná úprava sestává ze dvou aktivních zón a tří násobného kaskádovitého oplachu. Mezizóny zachytávají odkapávající vodu a odvádějí ji zpět do příslušných nádob s lázní. Tím se minimalizuje její roznášení v rámci zařízení. [11]

V první zóně je svařenec odmaštěn rozpouštědlem za pomoci desítek trysek a teploty okolo šedesáti stupňů celsia. V následující zóně probíhá proces pasivace za stejné teploty a se stejným počtem trysek jako v předešlé zóně. Časy obou procesů se pohybují kolem osmdesáti sekund. V posledních třech zónách podstupuje mycí prostor proces oplachu. Zde trvá průchod každou ze zón přibližně čtyřicet sekund. [11]

### 5.2 Sušička zbytkové vody

Oba vjezdy a výjezdy do a ze sušičky jsou opatřeny separátně provozovanými vzduchovými propustmi, které brání výstupu tepla a současně zajišťují bezproblémový průjezd dílů transportním systémem. Optimální vertikální vedení vzduchu zaručuje kontrolovanou a stále stejnou cirkulaci dílů na sušení. Vedení vzduchu je realizováno systémem rozdělování vzduchu s vyfukovací podlahou a nasávacím stropem. Díky polohovacím ventilům je teplota vzduchu v celé peci stejná a konstantní. K vedení vzduchu jsou použity cirkulační turbíny sestávající se z oběžného kola, motoru a disku pro odvod tepla. [11]

## 6 Odstředivá čerpadla

Jedná se o čerpadla od německé firmy KSB s hřídelovým těsněním pro čerpání čistých nebo agresivních kapalin, které chemicky ani mechanicky nenarušují materiály čerpadla. Čerpaná média tak mohou být pitná voda, teplá voda, chladicí kapalina i procesní voda. Hlavními oblastmi používání jsou čističky, úpravy vody, zařízení pro zásobování vodou, hasící zařízení, teplovodní vytápění, průmyslová mycí zařízení a tak dále. Všechna čerpadla jsou instalována v horizontálním provedení. [12]

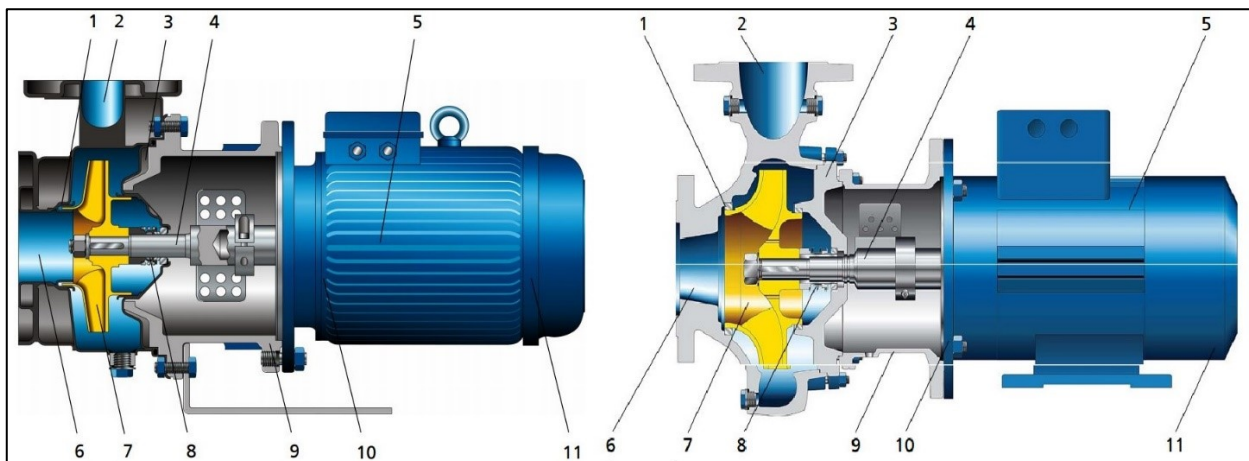


Obr. 32 Monoblokové čerpadlo Etachrom B, Blokové čerpadlo Etabloc. [12]

Čerpadlo je s pohonem pevně spojeno. Pracovní komora čerpadla je prstencového tvaru. Soustrojí je uchyceno za pomoci patky čerpadla nebo elektromotoru k pevnému podkladu. Jako pohon je použit trojfázový povrchově chlazený motor s kotvou nakrátko dle IEC od firmy KSB/Siemens. Jako oběžné kolo je použito uzavřené radiální kolo s prostorově zakřivenými lopatkami. [12]

### 6.1.1 Konstrukce a funkce

Čerpadlo je konstruováno pro vstup proudění v axiálním směru a pro výstup v radiálním směru. Hydraulika je s motorem pevně spojena za pomoci spojky a násuvné hřídele nebo má s motorem společnou hřídel. [12]



Obr. 33 Průřez čerpadla. 1- škrťací štěrba, 2- výtlačné hrdlo, 3- víko tělesa, 4- hřídel, 5- těleso motoru, 6- sací hrdlo, 7- oběžné kolo, 8- hřídelové těsnění, 9- lucerna pohonu, 10- valivé ložisko na straně čerpadla, 11- valivé ložisko na straně pohonu [12]

Přepřavované médium vstupuje do čerpadla sacím hrdlem (6). Dále je urychleno rotujícím oběžným kolem (7) a dopravováno směrem k výtlačnému hrdlu (2), kde vytéká z čerpadla. Při protékání komorou čerpadla se kinetická energie média mění na tlakovou energii. Škrťací štěrba (1) zabraňuje zpětnému proudění čerpaného média z pracovní komory čerpadla do sacího hrdla. Na zadní straně oběžného kola je hydraulika omezena víkem tělesa (3), kterým je vedena hřídel (4). K utěsnění hřídele ve víku tělesa vůči okolnímu prostředí je použito dynamické hřídelové těsnění. Tato hřídel má podpěry ve dvou valivých ložiscích (10 a 11), které jsou uloženy v tělese motoru. Spojení mezi čerpadlem a pohonem je zajištěno lucernou pohonu (9). [12]

### 6.1.2 Servis a údržba

Chod čerpadla by měl být stále klidný a bez větších otřesů. Kontrola hřídelových těsnění by měla probíhat v pravidelných prohlídkách. Vibrace, zvýšený odběr proudu nebo hluk při nezměněných podmínkách mohou poukazovat na vzniklé opotřebení na funkčních částech čerpadla. Při pravidelných kontrolách teploty ložisek by neměla teplota přesáhnout 90 °C. [12]

## 7 ČISTIČKA ODPADNÍHO VZDUCHU

Čistička odpadního vzduchu slouží k čištění procesního odpadního vzduchu z prostoru galvanizovny (odmašťování a pasivace). Čištění odpadního vzduchu probíhá pomocí vody, která se prostřednictvím přísady hydroxidu sodného udržuje na potřebné hodnotě pH.[11]

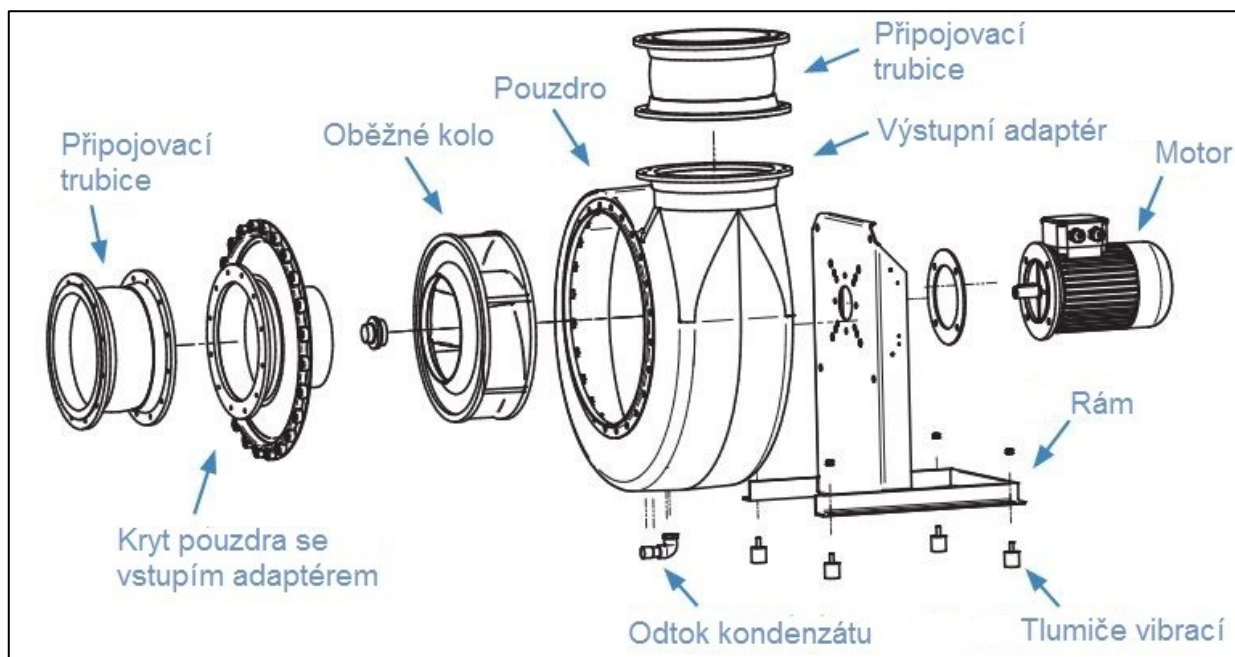
Ze skladovací nádrže je pomocí oběhového čerpadla do čističky odpadního vzduchu zaváděno čistící médium. Hodnota pH a průtočné množství obíhajícího media jsou nepřetržitě sledovány senzory. Tlak ve vedení indikuje manometr. Přívod hydroxidu sodného zajišťuje čerpadlo z nádrže s monitorováním úrovně naplnění. Vyčištěný odpadní vzduch je odváděn ventilátorem se zpětným odvodem kondenzátu. Průtok odpadního vzduchu je monitorován měřením tlaku. [11]

### 7.1 Radiální ventilátor pro odvod vyčištěného odpadního vzduchu

Pro odvod vyčištěného odpadního vzduchu je použit plastový odstředivý ventilátor odolný proti korozi se spékaným neboli sintrovaným pouzdrům. Obsahuje kondenzační potrubí v nejnižším bodě krytu. Podle pravidel prevence a jako ochrana proti možným střepinám je kolem pouzdra drátěné pletivo potažené plastem. [13]

Oběžné kolo je staticky i dynamicky vyváženo a obsahuje šest dozadu zahnutých lopatek. Dle mezinárodní normy DIN ISO 21940-11 by měl být stupeň jakosti vyvážení alespoň 6,3 G. Do této kategorie stupně vyvážení patří právě ventilátory, ozubená kola, strojírenství obecně, obráběcí stroje, papírenské stroje, stroje chemického průmyslu, čerpadla a další. [13]

Oběžné kolo je namontováno přímo na hřídeli motoru a pojištěno kuželovou pojistkou namontovanou rovněž na hřídel motoru. Rám ventilátoru je umístěn ve svařované pozinkované ocelové konstrukci. [13]



Obr. 34 Ventilátor pro odvod vyčištěného vzduchu [13]

## 7.2 Čištění a údržba

Obecné intervaly údržby a čištění výrobce neuvádí, protože podmínky použití se individuálně liší. Intervaly čištění je nutné určit empiricky a dokumentovat je. [13]

První prohlídka by měla přijít na řadu v rozmezí v prvních deseti až padesáti hodinách provozu. Tato kontrola by se měla týkat posouzení klidného chodu a minimálních vibrací ventilátoru, motoru a uložení příruby nebo bloku. Dále pak jednou za směnu kontrola vibrací a hlučnost chodu ložisek. Při zvýšených vibracích se doporučuje kontrola oběžného kola z důvodu usazenin na lopatkách. [13]

## 8 ONLINE A OFFLINE DIAGNOSTIKA

Diagnostiku jako takovou můžeme rozdělit do dvou skupin. První skupinou je takzvaná offline diagnostika neboli periodická pochůzková diagnostika. U tohoto typu je prováděno ruční měření, které provádí technik diagnostik, v daném časovém rozmezí. Zde je možné efektivně nastavit systém pro určování budoucího vývoje detekovaných stavů formou periodického trendování celkových hodnot a FFT analýzou (Fast Fourier Transform – Rychlá Furierova transformace). Pochůzková diagnostika se rovněž dá využít při jednorázovém měření stavu stroje pro zjištění okamžitého stavu. Nevýhodou jednorázového měření je velice obtížné určit prognózu a vývoj závady. Dále je pochůzková diagnostika využívána například ke garančnímu měření při přejímkách zařízení nebo při měření v rámci záruky stroje.

Druhým typem je online diagnostika. Ta slouží k nepřetržitému sledování stavu strojního zařízení s podrobnou historií vývoje celkových hodnot. Tato metoda umožňuje přímé a okamžité FFT analýzy k určení specifikace poškození. Další neméně důležitou funkcí online systému na sledování vibrací je funkce zabezpečovací – ta slouží k ochraně stroje při překročení nastavených mezí a limitů a zabráňuje tak havárii a poškození sledovaného stroje. Efektivním prvkem pak může být vizualizace měřených parametrů za účelem interaktivního posouzení stavu sledovaného objektu nekvalifikovanou osobou.

### 8.1 Zavedení diagnostického systému

V segmentu výrobní linky SF08 – Pasivace svařence, se nachází celkem pět ventilátorů a sedm čerpadel. Čtyři ventilátory jsou nainstalovány na sušícím zařízení, za účelem cirkulace teplého vzduchu ve vnitřních prostorech zařízení. Další ventilátor slouží pro odvod neutralizovaného vzduchu z pasivační linky (viz. kapitola 7.1). Pět ze sedmi čerpadel jsou využívány k čerpání média do jednotlivých zón pasivační linky (viz. kapitola 5.1). Zbývá dvě čerpadla jsou čerpadla oběhová. U všech těchto sledovaných zařízení je dobrý stav a dostupnost nezbytné k chodu nejenom segmentu SF08, ale i ostatních navazujících segmentů výrobní linky svařence.

Jako nástroj technické diagnostiky k zavedení diagnostického systému je využito metod vibrodiagnostiky a termodiagnostiky. Online systém pro sledování vibrací je použit



u ventilátorů na sušičce zbytkové vody a u ventilátoru pro odvod neutralizovaného vzduchu z pasivační linky. Zde jsou sensory umístěny na obou ložiscích elektromotoru v radiálním směru a připevněny za pomoci dvousložkového epoxidového tmelu plněného ocelí. U pěti ventilátorů jsou nainstalovány piezoelektrické jednoosé akcelerometry od firmy Handsford Sensors a u posledního ventilátoru jsou použity MEMS kapacitní akcelerometry od firmy Ifm. Naměřená data vyhodnocují jednotky od Ifm, které jsou propojeny skrze PROFINET. Každá vyhodnocovací jednotka má přiřazenou svou IP adresu, ke které se lze vzdáleně připojit skrze parametrizační software VES004 pro vyhodnocovací jednotky.

U čerpadel je pak zajištěno sledování technického stavu objektu za pomoci pochůzkové diagnostiky. Měření vibrací probíhá na prvním a druhém ložisku elektromotoru a na pracovní komoře čerpadla. Měření probíhá ve všech třech směrech (horizontální, vertikální a axiální) za pomoci tříosého akcelerometru, který je připojen k vibračnímu analyzátoru od firmy CMMS.

Metody termodiagnostiky jsou zavedeny na všech sledovaných objektech. K vykonání bezkontaktního měření povrchové teploty je použita termokamera od firmy Fluke a jejich software Smartview pro vizualizaci naměřených dat. Jako metoda vyhodnocení byla použita metoda kvalitativní, která je založena na principu porovnávání termovizních snímků daného objektu. Tato metoda byla zvolena z důvodu konstantního provozu a neměnných podmínek měření sledovaných objektů.

## **8.2 Nastavení parametrizačního softwaru VES004 pro vyhodnocovací jednotky**

Parametrizační software VES004 slouží k nastavení a zapsání parametrů do vyhodnocovací jednotky. Prvním krokem je vytvoření a pojmenování projektu, zvolení typu použité vyhodnocovací jednotky a připojení k přiřazené IP adrese přes PROFINET. Dále jsem nastavil počet a typ dynamických vstupů. Dynamické vstupy slouží ke sledování připojených signálů v časové nebo frekvenční oblasti. Zde jsou dynamickými vstupy snímače vibrací neboli akcelerometry. Jde si vybrat přímo akcelerometry z nabídky produktů Ifm nebo i jiné typy akcelerometrů. Při použití jiných akcelerometrů než od firmy Ifm, je pak důležité zvolit princip na kterém snímač funguje, například piezoelektrický. Jelikož všechny sledované objekty pracují s otáčkami většími jak  $600 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , je nutné

u všech sensoru nastavit dle normy ČSN 10 816-3 filtr highpass 10 Hz, který odfiltruje nižší frekvence než je 10 Hz. Jako analogový vstup je možné připojit například snímač otáček nebo sensory pro měření teploty.

Následujícím krokem je nastavení tzv. objektů. Objekty se používají k výpočtu a sledování charakteristických hodnot, které lze vypočítat pro signály ze vstupů (analogové, dynamické nebo externí vstupy). Je tu i možnost si vybrat předdefinované typy objektů pro usnadnění konfigurace monitorovaných aspektů pro sledovaný stroj. Tyto předem nastavené objekty slouží pro monitorování nejčastějších úloh a lze je parametrizovat pomocí průvodce („wizard“).

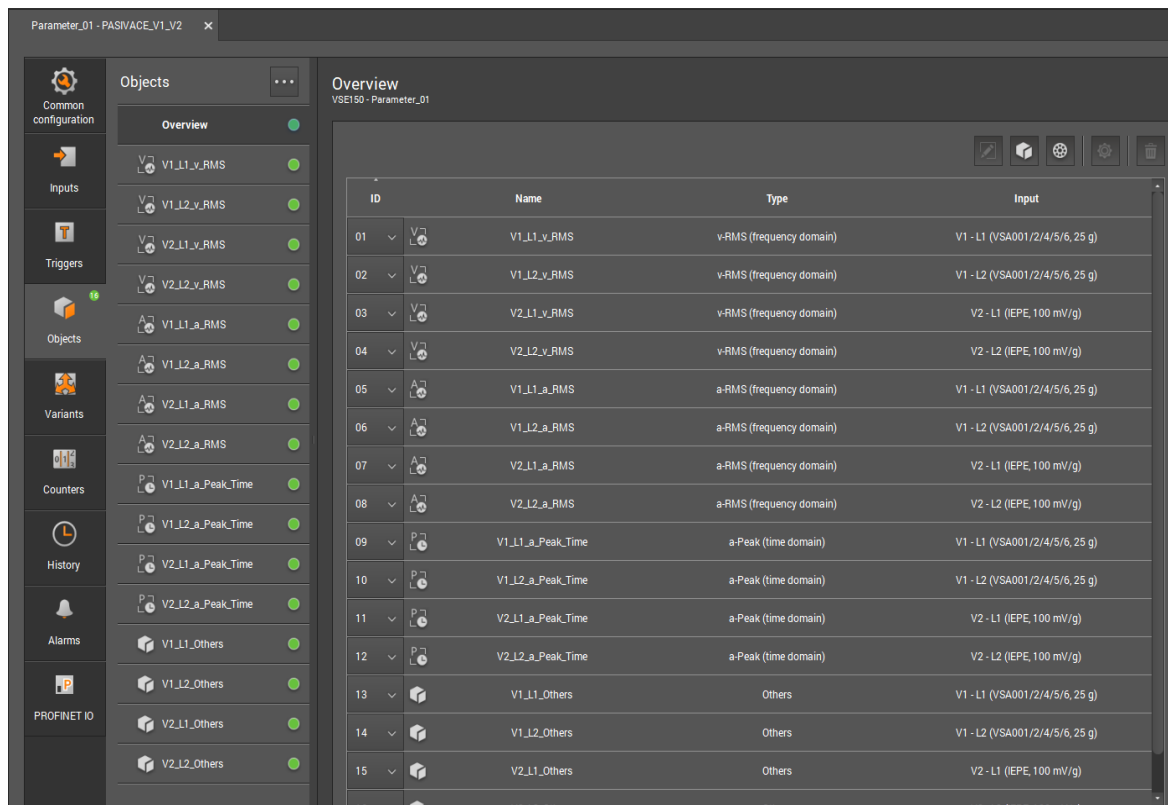
Seznam předdefinovaných objektů:

- Unbalance.
- Rolling element bearing.
- a-RMS (frequency range or time domain).
- v-RMS (frequency range or time domain).
- d-RMS (frequency range or time domain).
- Others.
- Upper limit monitor.
- Lower limit monitor.

RMS = efektivní hodnota (root mean square).

Objektem Unbalance se pozoruje nevyváženost sledovaného objektu za pomoci frekvence otáčení daného stroje. Tento objekt se využívá u ventilátorů, vřeten a motorů. Dále pak objekt Bearing, který sleduje poruchové frekvence zadaného ložiska. Typ ložiska se dá vybrat z integrované knihovny typů ložisek nebo vlastnoručním zadáním poruchových frekvencí ložiska do softwaru. Objekty typu a-RMS, v-RMS, d-RMS (frequency range) z frekvenční oblasti počítají efektivní hodnotu zrychlení, rychlosti a výchylky vibrací. Stejně tak objekty a-RMS, v-RMS (time domain) v časové oblasti počítají efektivní hodnotu zrychlení a rychlosti. Objekt Others lze libovolně konfigurovat a lze zde zapsat specifické frekvence poruch, jako například frekvence od průchodu lopatek, zubová frekvence apod. Tento objekt může fungovat i jako takzvaná „obálka“, která hledá ve frekvenčním spektru harmonické násobky. Objekt typu a-Peak (time domain) měří maximální amplitudu

na dynamickém vstupu v rámci nastavené doby měření. V tomto objektu je možné vypořizovat kavitaci na čerpadlech nebo tření kov na kov (např. u poškození ložiska). Vzhledem k možnému nastavení velmi krátké doby měření (nastavitelná mezi 0,64 a 1,3 sekund) je tento objekt velmi užitečný pro ochranu stroje, například v případě havárie.



ID	Name	Type	Input
01	V1_L1_v_RMS	v-RMS (frequency domain)	V1 - L1 (VSA001/2/4/5/6, 25 g)
02	V1_L2_v_RMS	v-RMS (frequency domain)	V1 - L2 (VSA001/2/4/5/6, 25 g)
03	V2_L1_v_RMS	v-RMS (frequency domain)	V2 - L1 (IEPE, 100 mV/g)
04	V2_L2_v_RMS	v-RMS (frequency domain)	V2 - L2 (IEPE, 100 mV/g)
05	V1_L1_a_RMS	a-RMS (frequency domain)	V1 - L1 (VSA001/2/4/5/6, 25 g)
06	V1_L2_a_RMS	a-RMS (frequency domain)	V1 - L2 (VSA001/2/4/5/6, 25 g)
07	V2_L1_a_RMS	a-RMS (frequency domain)	V2 - L1 (IEPE, 100 mV/g)
08	V2_L2_a_RMS	a-RMS (frequency domain)	V2 - L2 (IEPE, 100 mV/g)
09	V1_L1_a_Peak_Time	a-Peak (time domain)	V1 - L1 (VSA001/2/4/5/6, 25 g)
10	V1_L2_a_Peak_Time	a-Peak (time domain)	V1 - L2 (VSA001/2/4/5/6, 25 g)
11	V2_L1_a_Peak_Time	a-Peak (time domain)	V2 - L1 (IEPE, 100 mV/g)
12	V2_L2_a_Peak_Time	a-Peak (time domain)	V2 - L2 (IEPE, 100 mV/g)
13	V1_L1_Others	Others	V1 - L1 (VSA001/2/4/5/6, 25 g)
14	V1_L2_Others	Others	V1 - L2 (VSA001/2/4/5/6, 25 g)
15	V2_L1_Others	Others	V2 - L1 (IEPE, 100 mV/g)

Obr. 35 Prostředí softwaru VES004 – záložka Objects [21]

## 8.2.1 v-RMS (frekvenci domain)

Jako první objekt pro ventilátory jsem zvolil v-RMS (frekvenci domain), neboli efektivní hodnota rychlosti vibrací z frekvenční oblasti. Tento objekt mi přinese celkový přehled o rychlosti vibrací a mechanických závadách na ventilátoru. Efektivní hodnota rychlosti vibrací je důležitým hodnotícím parametrem, neboť tuto hodnotu používají normy ke zhodnocení technického stavu zařízení. Nejpoužívanější normou pro hodnocení vibrací je norma ČSN ISO 10816 část 3., která se týká průmyslových strojů nad 15 kW. Pro průmyslové ventilátory ale existuje norma ČSN ISO 14694, která se zabývá specifikací kvality vyvážení a úrovní vibrací.

U tohoto objektu jsem nastavil frekvenční rozsah, ze kterého se bude počítat efektivní hodnota rychlosti vibrací (v-RMS), na 10 až 1000 Hz. Tento rozsah je dán uvedenými normami a v tomto rozsahu se mi budou objevovat mechanické závady typu: nevývaha,

nesouosost, nevyváženost převislého rotoru, frekvence od průchodu lopatek nebo také síťová frekvence, která může naznačovat nesymetrii magnetického pole mezi rotorem a statorem. Dále jsem nastavil limitní hodnoty, při jejichž překročení budu upozorněn barevným semaforem. Dle normy ČSN ISO 14694 jsou limitní hodnoty pro tuhé uložení nastaveny pro výstrahu (pásmo B/C)  $4,50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , a pro přerušení provozu (pásmo C/D)  $7,10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Posledním krokem je nastavení průměrování. Funkce průměrování potlačuje krátkodobé události, jako jsou například rázy, a funguje na principu váhového faktoru. Na obrázku č. 36 můžeme vidět diagram, který znázorňuje, jak se hodnota objektu přibližuje konstantní měřené hodnotě.

### Příklad průměrování:

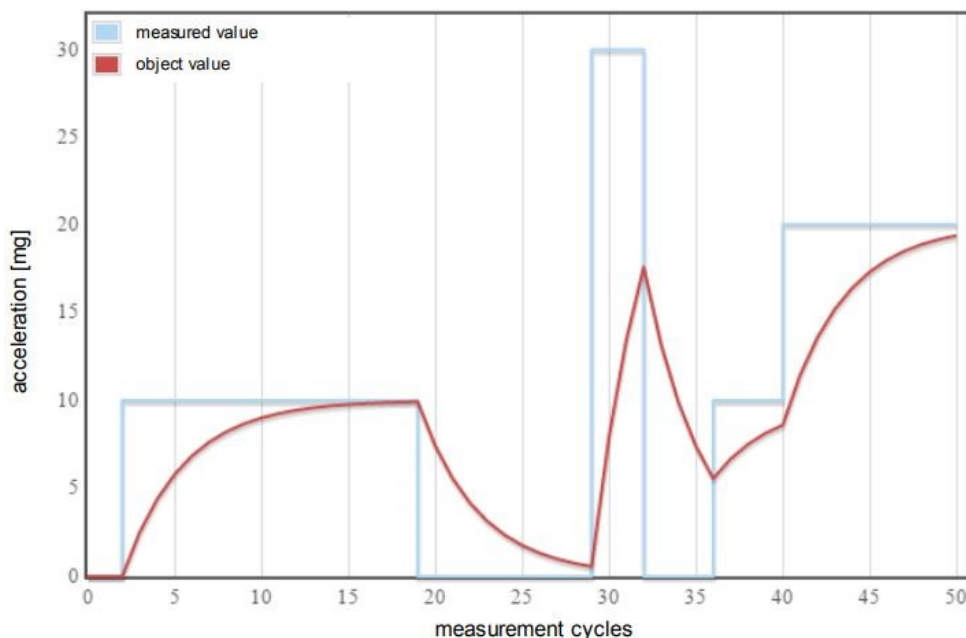
Poslední hodnota objektu =  $3,8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , naměřená hodnota =  $7,1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , průměrování =  $1/8$ .

Nová hodnota objektu:

Hodnota objektu = poslední hodnota objektu  $\cdot (1 - \text{průměrování}) + \text{hodnota měření} \cdot \text{průměrování}$

Hodnota objektu =  $3,8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1} \cdot (1 - 1/8) + 7,1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1} \cdot 1/8$

Hodnota objektu =  $4,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 36 Diagram znázorňující přiblížení hodnoty objektu k naměřené hodnotě [14]

K tomuto průměrování se váže i tzv. Response delay neboli zpoždění odezvy. Tato funkce funguje jako čítač, který spouští poplach až poté co hodnota objektu postupně překročí nebo klesne pod limit  $x$  krát ( $x$  = hodnota zpoždění odezvy). Zpoždění odezvy má tedy velký vliv na dobu odezvy alarmu. Například u havárie vřetena musí být zpoždění odezvy nastaveno na „1“, aby se získal nejrychlejší možný havarijní alarm. V mém případě jsem nastavil hodnotu průměrování na 1/4 a hodnotu zpoždění odezvy 5, kdy hodnota pro spuštění alarmu musí pětkrát překročit stanovené limity, a to v intervalu 29,48 sekund.

### **8.2.2 a-RMS (frequenci domain)**

Dalším objektem je a-RMS (frequenci domain) neboli efektivní hodnota zrychlení vibrací z frekvenční oblasti. V tomto případě mě bude zajímat širokopásmové zrychlení, a proto zde musí být zvolen větší frekvenční rozsah, konkrétně jsem zvolil od 10 Hz do 5 kHz. V tomto frekvenčním rozsahu mohu sledovat projevy závad valivých ložisek, špatného nebo dobrého mazání nebo také závady elektrického původu.

Metodu analýzy signálu jsem zvolil FFT (Fast Fourier Transform). S nastavením limitů to je zde obtížnější. Žádná norma nepopisuje celkové hodnoty zrychlení vibrací a jejich hodnotící pásma. K nastavení těchto hodnot je potřeba odborných znalostí a praxe. Jelikož jsou tyto ventilátory úplně nové, neměli by hodnoty zrychlení určitě přesahovat 1,5 g. Po konzultaci s odborníky s letitou praxí na technickou diagnostiku byly limity pro tyto ventilátory stanoveny pro výstrahu na 0,5g a pro přerušení provozu na 0,8g.

Hodnotu průměrování a zpoždění odezvy jsem nastavil stejně jako u efektivní hodnoty rychlosti vibrací, tedy hodnotu průměrování na 1/4 a zpoždění odezvy na hodnotu 5 s časovým intervalem 29,48 sekund.

### **8.2.3 a-Peak (time domain)**

Zde se budu zabývat špičkovou hodnotou zrychlení vibrací, na rozdíl od předešlých objektů, které se zabývali efektivní hodnotou vibrací. V tomto objektu mě bude zajímat špičková energie způsobená rázy a impulsy, například u elektromotorů může být tato špičková energie způsobena poruchou ložiska. Z tohoto důvodu je zde nastaven filtr s horní propustí na 600 Hz. Účelem tohoto nastavení je odfiltrovat všechny nízkofrekvenční děje a amplitudy na otáčkové frekvenci a sledovat pouze ty vysokofrekvenční děje.

Dále jsem nastavil čas měření na největší možnou hodnotu 1,31 sekundy, v podstatě jde jen o rychlost vzorkování a jelikož zde není potřeba sledovat velice krátké děje, bude tato hodnota dostačující. Jelikož se jedná o špičkovou hodnotu vibrací, budou se zde objevovat větší hodnoty než u RMS a je potřeba nastavit vyšší limitní hodnoty. Pro výstrahu jsem hodnotu zrychlení nastavil na 1,5g a pro přerušení provozu 2,0g. Průměrování jsem zde nechal na hodnotě 1/1, hlavně kvůli ventilátoru s frekvenčním měničem s nestacionárním provozem. Časovou odezvu jsem nastavil na hodnotu 5 s časovým intervalem 6,55 sekund.

#### **8.2.4 Others**

Tento objekt je velmi univerzální a dá se nastavit i jako širokopásmová obálka. Obálková metoda zjednodušeně řečeno hledá ve frekvenčním spektru harmonické násobky daných frekvencí. Tato metoda slouží například k nalezení defektních frekvencí ložisek. Tento objekt je závislý na otáčkách, proto jsem nejprve musel zadat provozní otáčky ventilátorů.

Pokud známe typ ložisek, stačí použít objekt Bearing, vyhledat v databázi daný typ ložiska a software pak sám sleduje poruchové frekvence zvolených ložisek. Pokud typ ložisek neznáme, dá se to v tomto případě obejít a nastavit široké pásmo (např. od 10 Hz do 1000 Hz), ve kterém jsou tyto defektní frekvence ložisek vyhledávány. Nevýhodou této širokopásmové oblasti je, že se zde mohou objevovat i frekvence od ozubení atd. Primárně je tento objekt přizpůsoben na ozubení, ale dá se využít i u sledování stavu ložisek.

Poruchy ložisek se ve frekvenčním spektru napřed projeví na vyšších frekvencích, například od 5 kHz. Z tohoto důvodu jsem nastavil filtr s horní propustí na 1200 Hz, aby se mi zde neobjevovali nízkofrekvenční děje. Vzorkovací frekvenci jsem nastavil na 1,5 Hz. Jedná se o nový motor s novými ložisky, tudíž hodnoty vibrací by měly být nízké. Konkrétně jsem pak nastavil limitní hodnoty pro výstrahu na 0,08g a pro přerušení provozu na 0,1g. Hodnotu průměrování jsem nastavil na 1/2 a zpoždění odezvy na hodnotu 5 s časovým intervalem 29,48 sekund.

## 9 ZHODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU SLEDOVANÝCH OBJEKTŮ

V první řadě je nutno zmínit, že se jedná o nově vystavěné zařízení. Prvotní měření probíhala v takzvaném odlaďovacím provozu a až postupem času se linka uváděla do jednosměnného, dvousměnného a nakonec do nepřetržitého provozu. Prvotní měření tedy měla za cíl naměřit referenční hodnoty a popřípadě zjistit závady vzniklé dopravou zařízení do závodu nebo při jeho montáži.

U offline diagnostiky bylo měření prováděno ve čtyřtýdenních intervalech, u online diagnostiky potom probíhalo nepřetržitě. Aplikovanou metodou technické diagnostiky byla vibrodiagnostika a termodiagnostika. U čerpadel byly vibrace měřeny na obou ložiscích elektromotoru a na pracovní komoře čerpadla v horizontálním, vertikálním a axiálním směru. U ventilátoru byly vibrace měřeny pouze na ložiscích elektromotoru v horizontálním směru. Číslování ložisek bylo provedeno od volného konce elektromotoru (to je na straně integrovaného chladicího ventilátoru elektromotoru).

K pochůzkovému měření vibrací byl použit vibrační analyzátor od firmy CMMS s tříosým snímačem zrychlení vibrací. Uchycení snímače bylo provedeno za pomoci integrovaného permanentního magnetu. U online sledování vibrací byly použity jednoosé piezoelektrické a MEMS snímače zrychlení vibrací od firmy Handsford Sensors a Ifm. Pro bezdotykové měření povrchové teploty sledovaných objektů byla použita termokamera Fluke Ti401 PRO. Pro vyhodnocení termovizních měření byla použita metoda kvalitativní.



Obr. 37 Zleva vibrační analyzátor[11], MEMS akcelerometr[14], Handsford Sensors akcelerometr [15], Vyhodnocovací jednotka [14].

Měření a vyhodnocení celkové hodnoty vibrací bylo provedeno za pomoci norem ČSN ISO 20 816 – 1, ČSN ISO 10 816 – 7 a normy ČSN ISO 14 694. První část normy ČSN ISO 20 816 stanovuje všeobecné podmínky a postupy při měření a hodnocení vibrací pomocí měření prováděných na nerotujících částech a v dostupných případech na částech s nevratným pohybem kompletních strojů. Obecná kritéria hodnocení, která jsou prezentována ve tvaru jak velikosti, tak i změny vibrací, se vztahují na provozní monitorování i přejímací zkoušky. Sedmá část této normy se specializuje na odstředivá čerpadla pro průmyslová použití včetně měření na rotujících hřídelích. Dále pak poskytuje instrukce pro hodnocení vibrací odstředivých čerpadel pro průmyslové aplikace se jmenovitým výkonem nad 1 kW a specifikuje pásma a meze vibrací horizontálních a vertikálních čerpadel bez ohledu na pružnost jejich uložení.

Norma ČSN ISO 14 694 poskytuje specifikace mezí vibrací a vyvážení ventilátorů pro všechny aplikace. Omezuje se na ventilátory všech typů, instalované s výkonem menším než 300 kW, nebo ke komerčně dostupnému standardnímu elektromotoru s maximálním výkonem 355 kW. Norma také rozděluje ventilátory dle typu použití a výkonu pohonu do skupin s označením BV-1 až BV-4. Sledované ventilátory spadají do skupiny BV-3, která zahrnuje využití pro průmyslové procesy s výkonem pohonu do 300 kW.

### **Meze pásem hodnocení vibrací na nerotujících částech odstředivých čerpadel dle normy ČSN ISO 10 816-7:**

*Tab. 1 Meze pásem rychlosti vibrací na nerotujících částech odstředivých čerpadel o výkonu nad 1 kW [18]*

Pásmo	Popis	Mez rychlosti vibrací Efektivní hodnota mm/s			
		Kategorie I		Kategorie II	
		≤ 200 kW	> 200 kW	≤ 200 kW	> 200 kW
A	Nově přejímané stroje v doporučeném rozsahu	2,5	3,5	3,2	4,2
B	Neomezený dlouhodobý provoz v dovoleném pracovním rozsahu	4,0	5,0	5,1	6,1
C	Omezený provoz	6,6	7,6	8,5	9,5
D	Riziko poškození	> 6,6	>7,6	>8,5	>9,5

- Kategorie I – čerpadla vyžadující vysokou úroveň spolehlivosti (čerpadla pro toxické nebo nebezpečné látky).
- Kategorie II – čerpadla pro všeobecné nebo méně důležité látky.



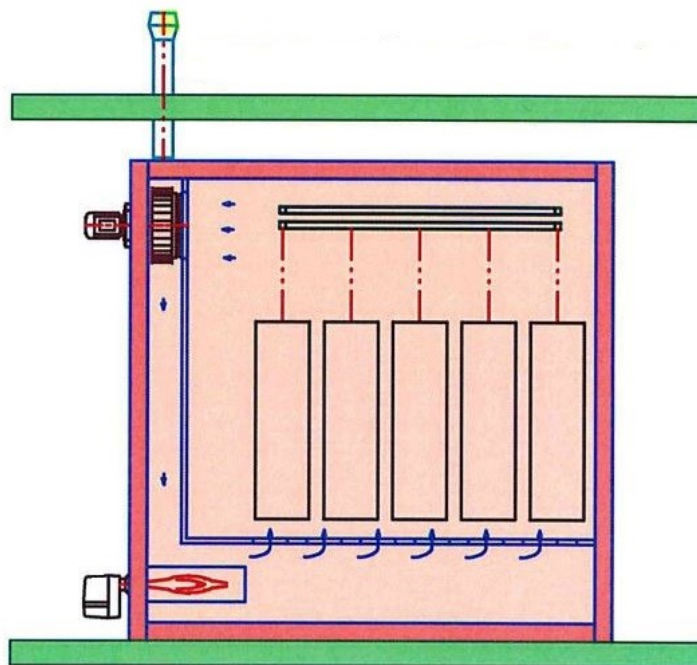
## Meze pásem hodnocení vibrací pro průmyslové ventilátory dle normy ČSN ISO 14 694:

Tab. 2 Meze pásem hodnocení vibrací pro průmyslové ventilátory [19]

Stav	Kategorie použití ventilátorů	Tuhé uložení $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$		Pružné uložení $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	
		Špičková	Efektivní	Špičková	Efektivní
Počáteční	BV-3	6,4	4,5	8,8	6,3
Výstraha		10,2	7,1	16,5	11,8
Odstavení		12,7	9,0	17,8	12,5

### 9.1 Průmyslové radiální ventilátory

Ve všech případech jsou sledovanými objekty průmyslové radiální ventilátory s pohonem o výkonu od 4 kW do 11 kW. Ventilátory na sušícím zařízení mají za úkol cirkulaci ohřátého vzduchu, tak jak je znázorněno na obr. 38. Poslední ventilátor slouží pro odvod odpadního vzduchu z pasivační linky. U všech těchto ventilátorů jsou oběžná kola spojena napřímo s pohonem. Rám ventilátoru pro odvod zneutralizovaného vzduchu je uložen na tlumičích vibrací. Cirkulační ventilátory jsou napevno.

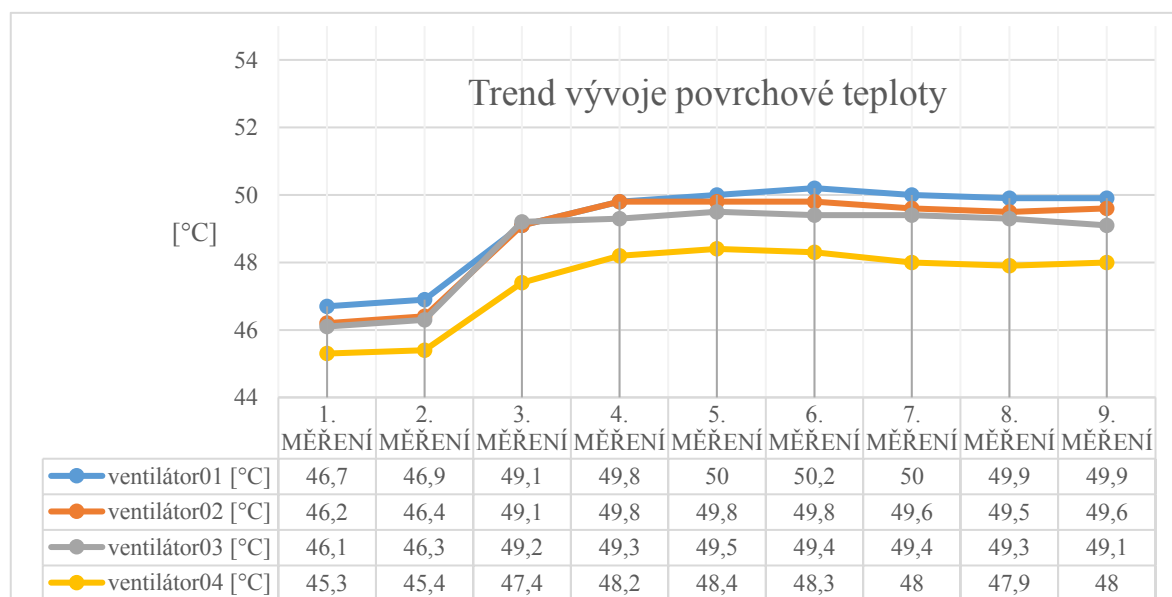


Obr. 38 Průmyslové ventilátory a princip proudění vzduchu ve sušícím zařízení [21]

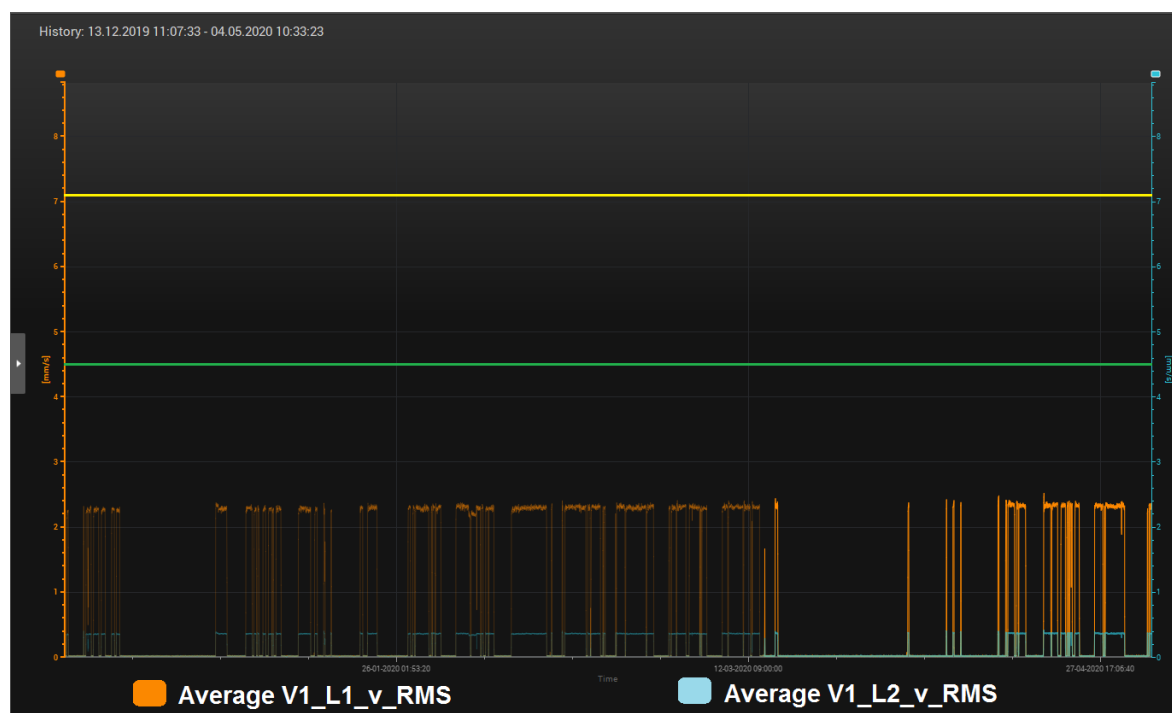
### 9.1.1 Radiální ventilátory pro cirkulaci vzduchu v sušícím zařízení

Tab. 3 Štítkové parametry ventilátoru 1 až 4

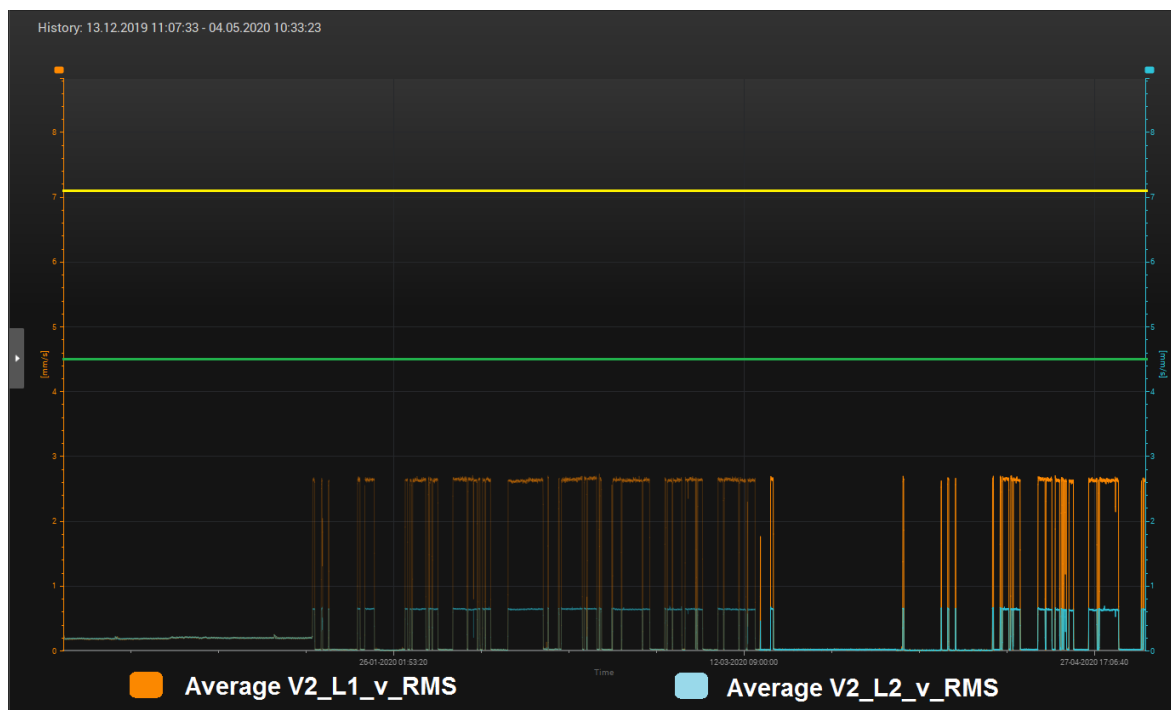
PARAMETRY VENTILÁTORŮ 1 AŽ 4			
Parametry elektromotoru		Parametry ventilátoru	
Jmenovitý výkon [kW]:	4,00	Počet lopatek:	36,00
Jmenovité otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]:	968	$\varnothing$ oběžného kola [mm]:	320,00
Ložisko L1:	Nezjištěno		
Ložisko L2:	Nezjištěno		



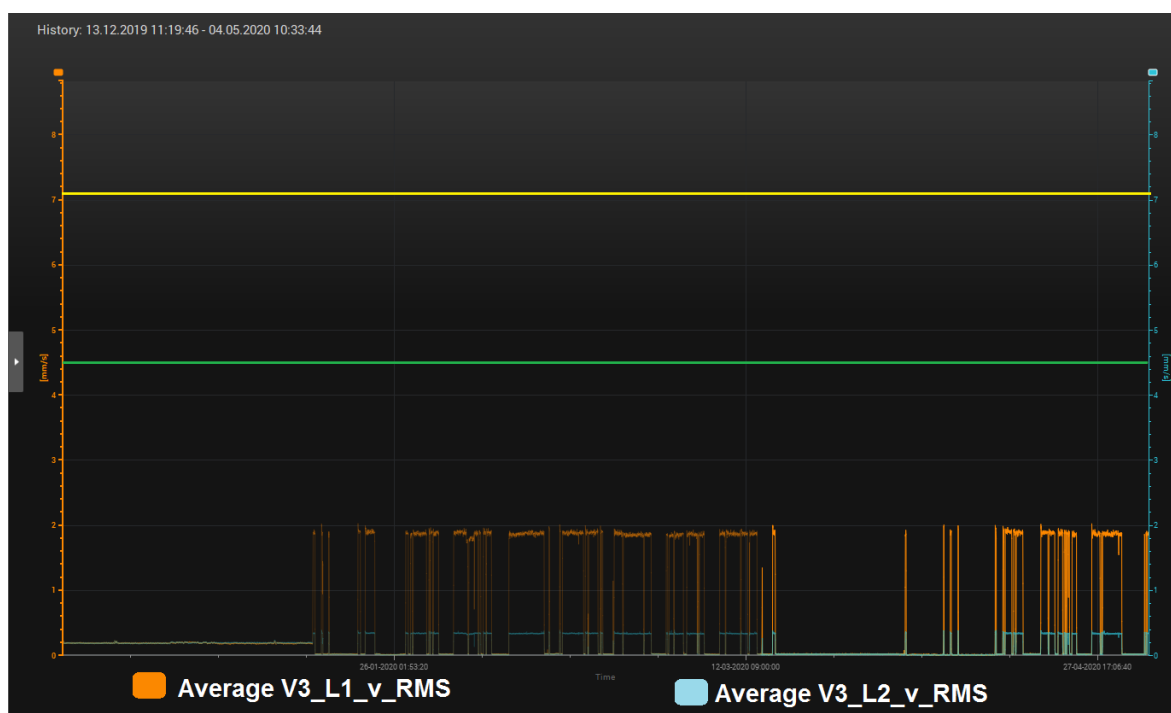
Graf 1 Trend vývoje povrchové teploty ventilátoru 1 až 4



Obr. 39 Historie vývoje efektivní hodnoty rychlosti vibrací ventilátoru 1



Obr. 40 Historie vývoje efektivní hodnoty rychlosti vibrací ventilátoru 2



Obr. 41 Historie vývoje efektivní hodnoty rychlosti vibrací ventilátoru 3



Obr. 42 Historie vývoje efektivní hodnoty rychlosti vibrací ventilátoru 4

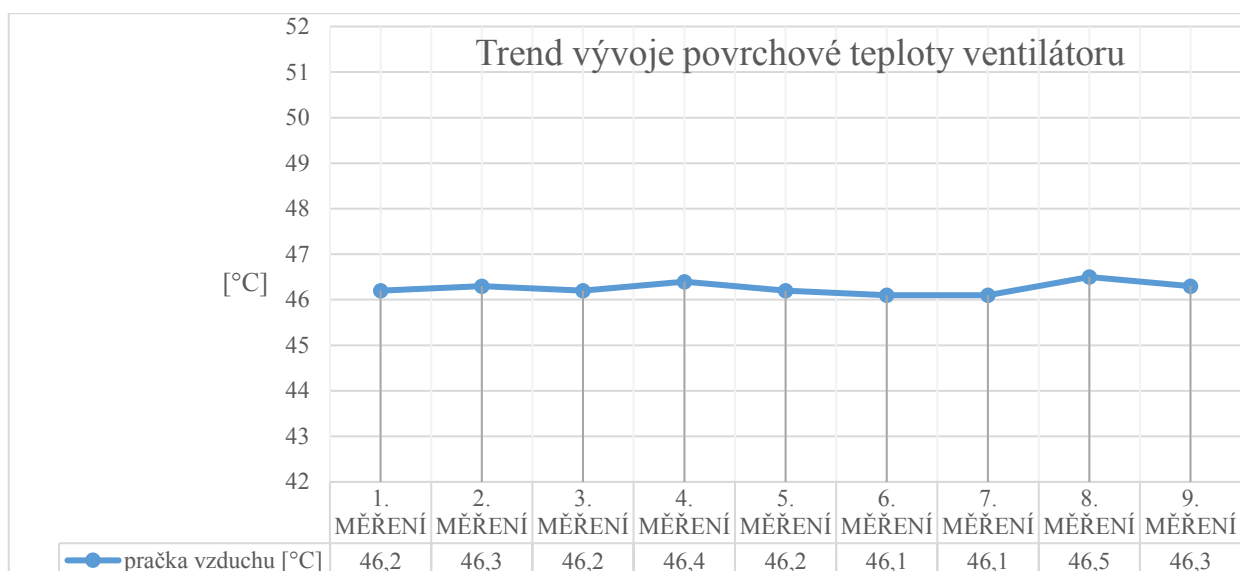
### 9.1.2 Radiální ventilátor pro odvod zneutralizovaného vzduchu

Tab. 4 Štítkové parametry ventilátoru pro odvod zneutralizovaného vzduchu

PARAMETRY VENTILÁTORŮ			
Parametry elektromotoru		Parametry ventilátoru	
Jmenovitý výkon [kW]:	11,00	Počet lopatek:	6,00
Jmenovité otáčky [min <sup>-1</sup> ]:	1440	Ø oběžného kola [mm]:	680,00
Ložisko L1:	6309 C3	Objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]:	10 000
Ložisko L2:	6309 C3		

Tab. 5 Poruchové frekvence valivých ložisek

Označení ložiska	f [Hz]	BPF0	BPF1	BSF	FTF
6309	1	3,02	4,96	1,95	0,38



Graf 2 Trend vývoje povrchové teploty ventilátoru pro odvod zneutralizovaného vzduchu



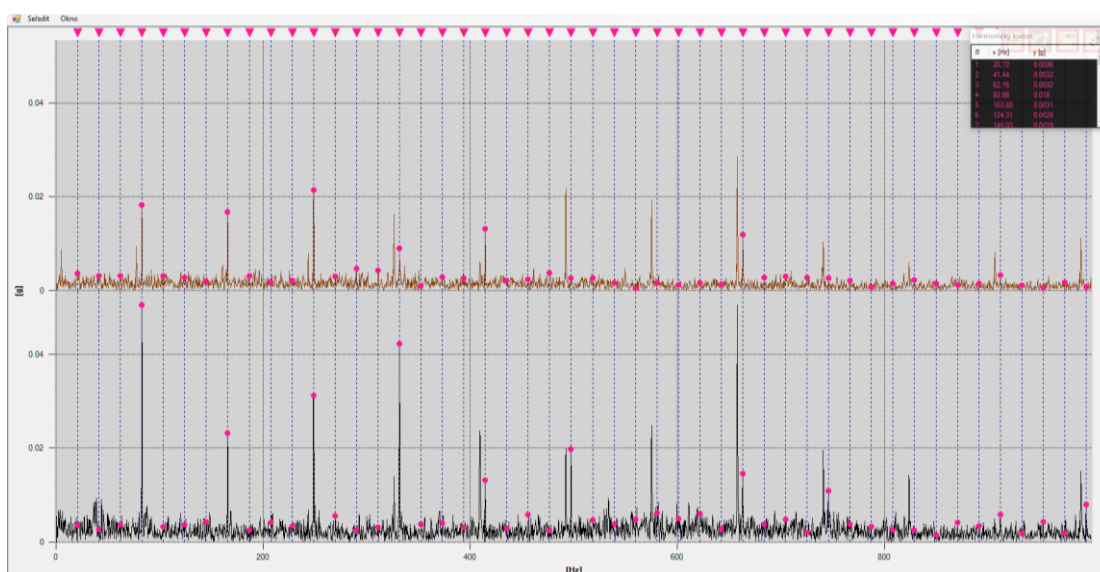
Obr. 43 Historie vývoje efektivní hodnoty rychlosti vibrací ventilátoru pro odvod zneutralizovaného vzduchu

### 9.1.3 Závěrečné zhodnocení technického stavu

U všech čtyřech ventilátorů celkové hodnoty rychlosti vibrací nepřesahují hodnotu  $4,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  (viz Obr.39-42) a dle normy ČSN ISO 14 694 se pohybují v zeleném pásmu. U všech těchto zařízení je patrný rozdíl mezi vibracemi v bodě L1 a L2. Tento rozdíl je způsoben vetknutým koncem elektromotoru, na kterém je umístěn měřicí bod L1. Tento konec má na rozdíl od bodu L2 tendenci kmitat vlivem chybějící podpory a z tohoto důvodu jsou

v tomto bodě hodnoty vibrací o něco vyšší. Ve frekvenčních spektrech všech ventilátorů od 10 Hz do 1 000 Hz je patrná pouze frekvence otáčení 16,4 Hz. U ventilátoru jedna a tři se také občas objevuje amplituda kolem frekvence 592 Hz. V tomto případě se jedná o frekvenci od průchodu lopatek, která je způsobena aerodynamickými silami nebo turbulentním prouděním. Tento jev může způsobit například tvar potrubí nebo přivřená klapka přívodu vzduchu.

Dalším sledovaným objektem je radiální ventilátor pro odvod zneutralizovaného vzduchu. Celková efektivní hodnota rychlostí vibrací v bodě L1 a L2 dlouhodobě nepřesahuje hodnotu  $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  (viz Obr. 43). Dle normy ČSN ISO 14 694 tedy tyto hodnoty leží v pásmu počátečního stavu (viz tab. 2). Ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací od 10 Hz do 1000 Hz je vidět pouze frekvence otáčení na 20,6 Hz a šestý násobek této frekvence, neboli frekvence od průchodu lopatek na cca 124 Hz. Frekvence od průchodu lopatek může naznačovat turbulentní jevy vlivem délky a tvaru použitého potrubí. Na této frekvenci je hodnota rychlosti vibrací cca  $0,04 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  a proto nepředstavuje problém pro chod ventilátoru. V obálce zrychlení vibrací se objevují harmonické násobky, které se mění s frekvencí otáčení (viz Obr.44). Jelikož se ale jedná o čtvrtý násobek otáčkové frekvence, není pravděpodobné že se tyto frekvence slučují s poruchovými frekvencí ložisek. V tomto případě by to mohl být také projev frekvenčního měniče, protože zvýšená amplituda se objevuje vždy na dvojnásobku napájecí frekvence regulátoru otáček. V praxi zvýšená amplituda na dvojnásobku síťové frekvence většinou poukazuje na elektrické problémy elektromotoru, resp. na nesymetrii elektromagnetického pole.



Obr. 44 Obálka zrychlení vibrací v bodě L1 a L2 v horizontálním směru

## 9.2 Horizontální odstředivá čerpadla

Sledovanými objekty jsou tomto případě odstředivá čerpadla (viz. kapitola 6) o výkonu od 3 do 15 kW. K dopravě media do jednotlivých zón jsou využita čerpadla s číslem dva, čtyři, pět, šest a sedm (viz. kapitola 5.1), zbylá dvě jsou čerpadla oběhová. Čerpadla jsou umístěna v bezpečnostní záchytné vaně, která má za úkol v případě průsaku lázně zachytit alespoň objem jedné z nich. Vlivem tohoto umístění jsou čerpadla uložena pouze na gumových podstavcích.



Obr. 45 Pasivní linka – zjednodušený layout

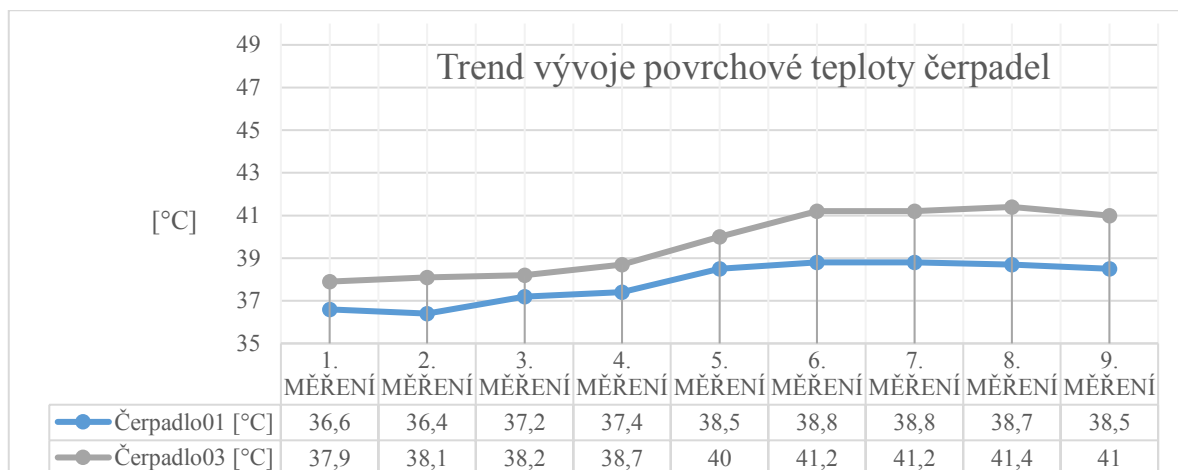
### 9.2.1 Horizontální čerpadla 1 a 3

Tab. 6 Štítkové parametry čerpadla 1 a 3

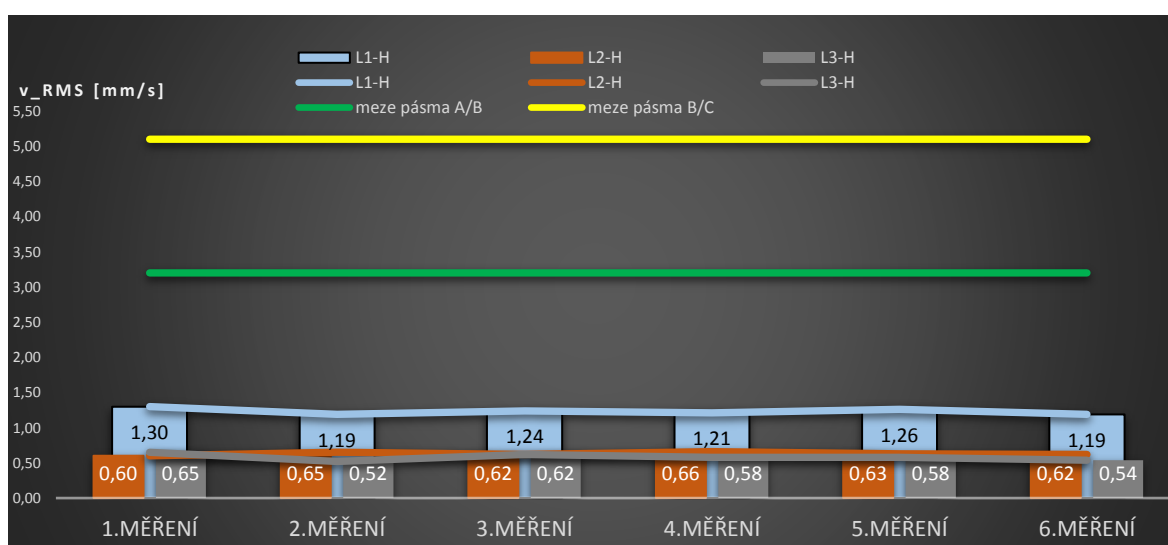
PARAMETRY ČERPADLA 1 A 3			
Konstrukční řada:		ETACHROM B	
Parametry elektromotoru		Parametry čerpadla	
Jmenovitý výkon [kW]:	3,00	Průtok [m <sup>3</sup> /h]:	41,83
Jmenovitá otáčky [min <sup>-1</sup> ]:	2910	Výtlačná výška [m]:	14,00
Ložisko L1:	6205 ZZ	Ø oběžného kola [mm]:	118,00
Ložisko L2:	6206 ZZ		

Tab. 7 Poruchové frekvence valivých ložisek

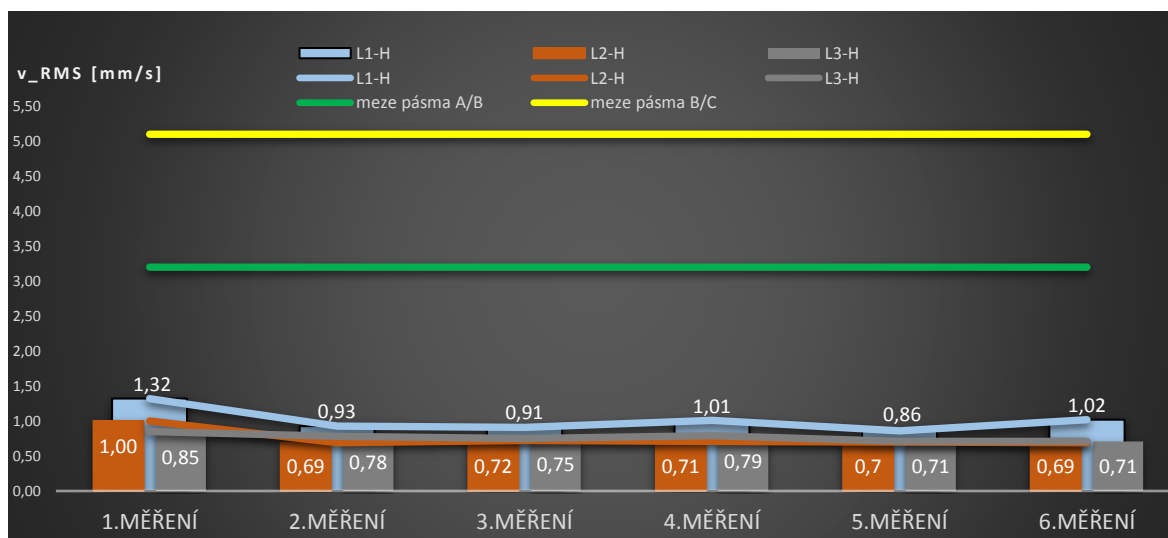
Označení ložiska	f [Hz]	BPF0	BPFI	BSF	FTF
6205	1	3,58	5,40	2,34	0,40
6206	1	3,56	5,42	2,30	0,40



Graf 3 Trend vývoje povrchové teploty čerpadel 1 a 3



Graf 4 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 1



Graf 5 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 3



## 9.2.2 Horizontální čerpadla 2 a 4

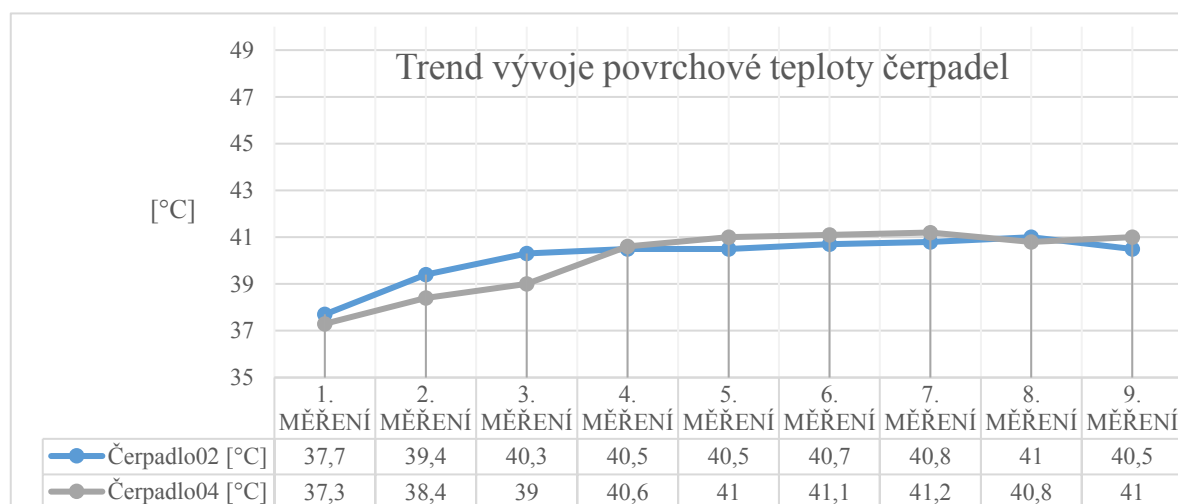
### Pohled na soustavy čerpadel a vyznačení měřených míst:

Tab. 8 Šítkové parametry čerpadla 2 a 4

PARAMETRY ČERPADLA 02 A 04			
Konstrukční řada:		ETABLOC	
Parametry elektromotoru		Parametry čerpadla	
Jmenovitý výkon [kW]:	15,00	Průtok [m <sup>3</sup> /h]:	162,24
Jmenovité otáčky [min <sup>-1</sup> ]:	2945	Výtlačná výška [m]:	21,00
Ložisko L1:	6209 ZZ C3	Ø oběžného kola [mm]:	141,00
Ložisko L2:	6309 ZZ C3		

Tab. 9 Poruchové frekvence valivých ložisek

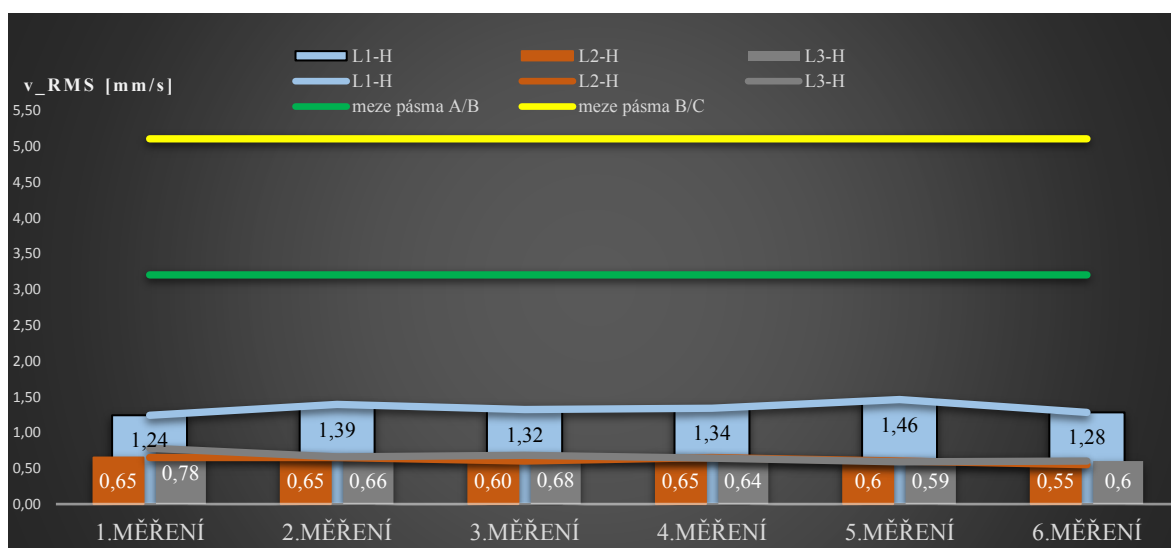
Označení ložiska	f [Hz]	BPF0	BPFI	BSF	FTF
<b>6209</b>	1	4,04	5,94	2,54	0,40
<b>6309</b>	1	3,02	4,96	1,95	0,38



Graf 6 Trend vývoje povrchové teploty čerpadel 2 a 4



Graf 7 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 2



Graf 8 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 4

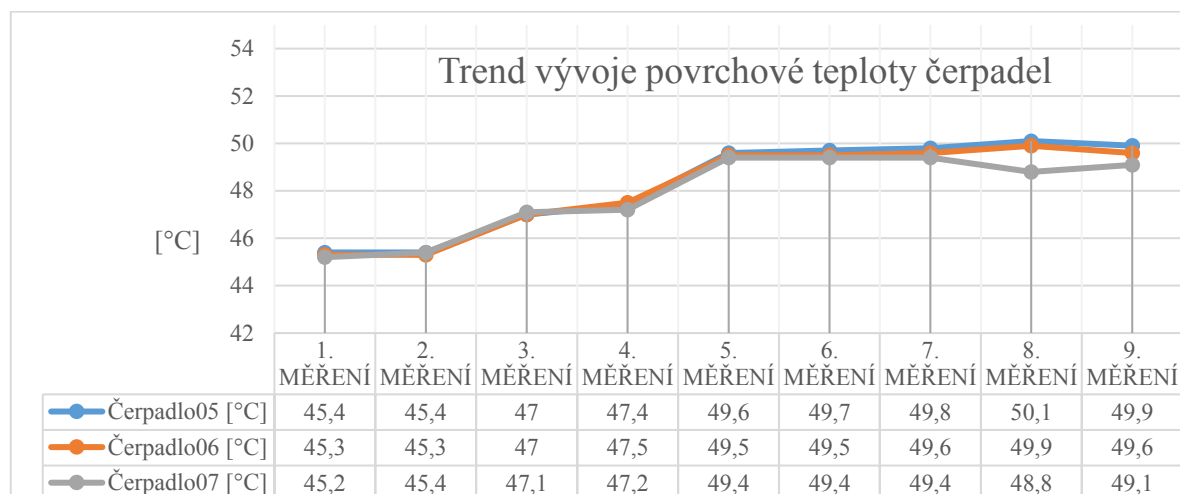
### 9.2.3 Horizontální čerpadla 5, 6 a 7

Tab. 10 Šítkové parametry čerpadla 5, 6 a 7

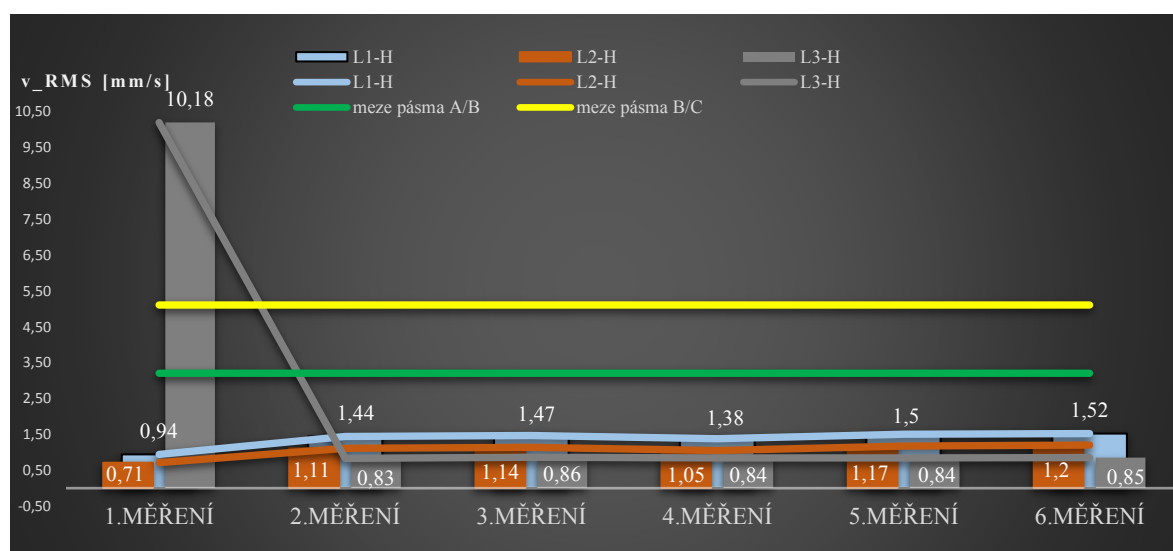
PARAMETRY ČERPADLA 2 A 04			
Konstrukční řada:		ETACHROM B	
Parametry elektromotoru		Parametry čerpadla	
Jmenovitý výkon [kW]:	7,00	Průtok [m <sup>3</sup> /h]:	100,00
Jmenovité otáčky [min <sup>-1</sup> ]:	1465	Výtlačná výška [m]:	18,00
Ložisko L1:	6207 ZZ	Ø oběžného kola [mm]:	249,00
Ložisko L2:	6308 ZZ		

Tab. 11 Poruchové frekvence valivých ložisek

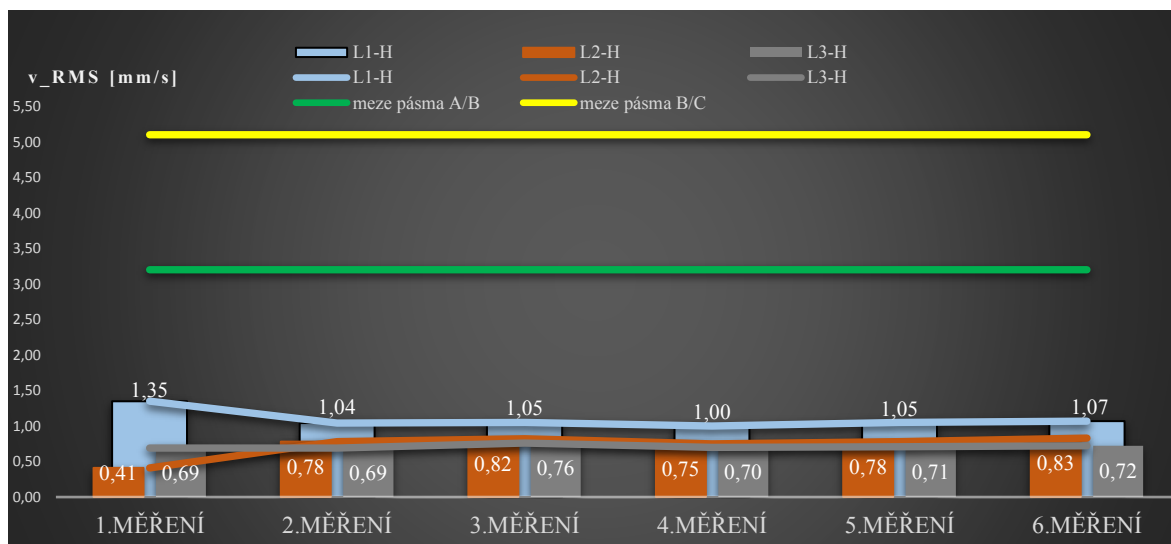
Označení ložiska	f [Hz]	BPF0	BPFI	BSF	FTF
6207	1	3,56	5,42	2,30	0,40
6308	1	3,06	4,92	2,02	0,38



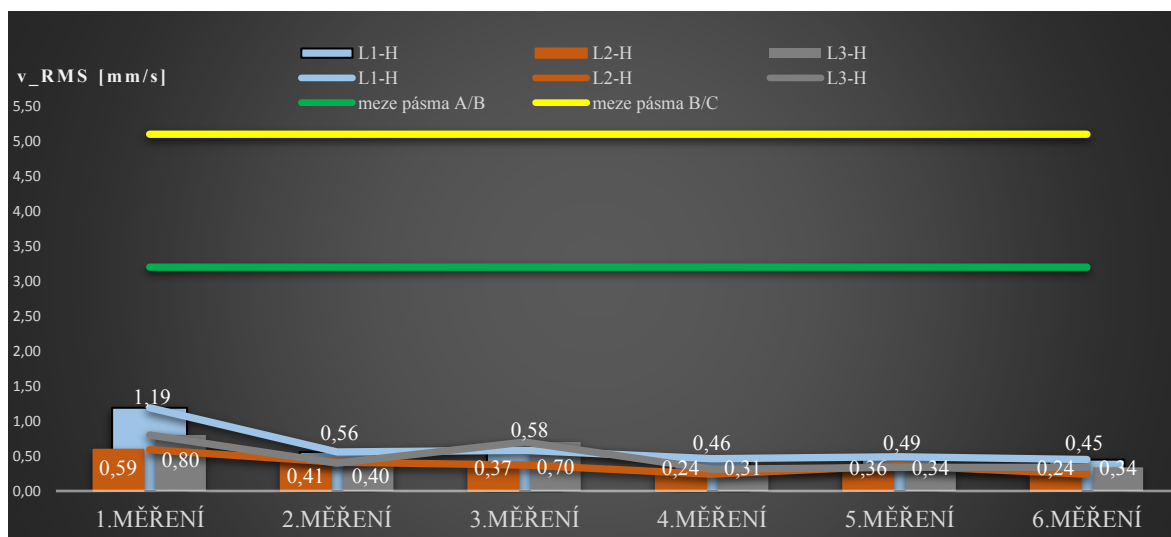
Graf 9 Trend vývoje povrchové teploty čerpadel 5, 6 a 7



Graf 10 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 5



Graf 11 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 6



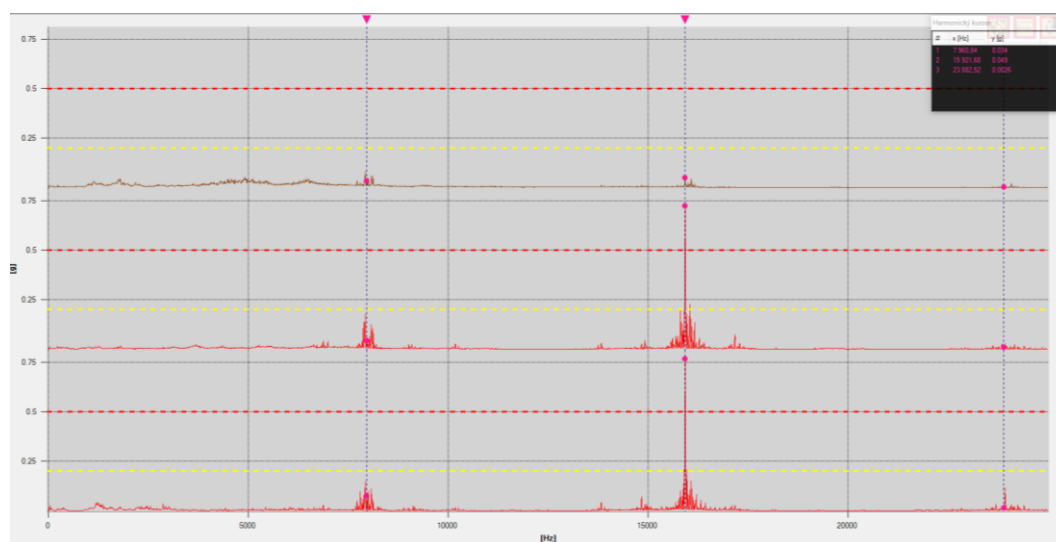
Graf 12 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 7

## 9.2.4 Závěrečné zhodnocení technického stavu

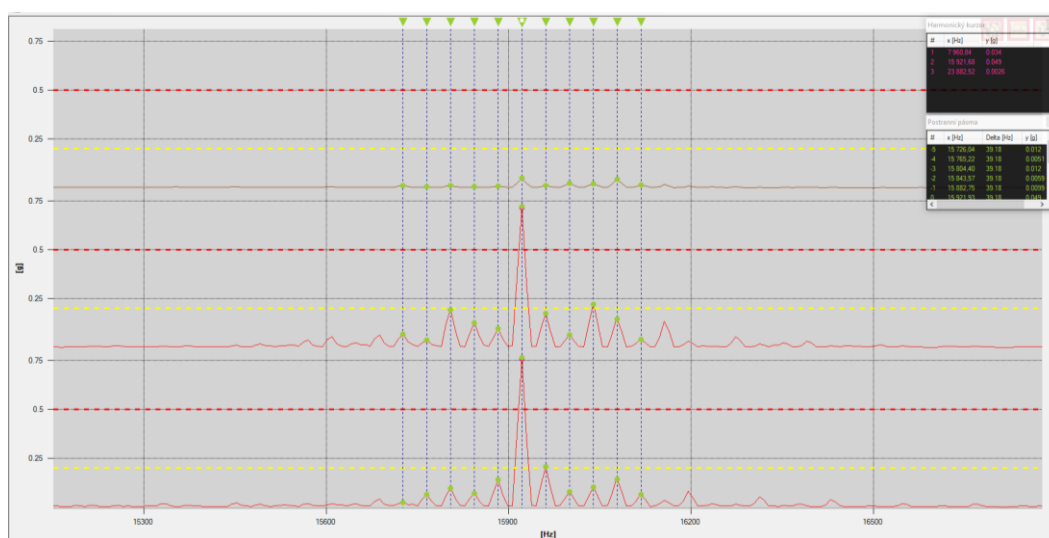
U oběhových čerpadel jsou hodnoty vibrací velmi malé a pohybují se v doporučených hodnotách. Konkrétně dle normy ČSN ISO 10 816-7 spadají do pásma A, kam patří nově přejímané stroje (viz tab.1). V porovnání s měřenými body nejvíce kmitají body L1, které se nachází na volném konci čerpadel (viz graf 4 a 5). Ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací od 10 do 1000 Hz je u obou čerpadel ve všech směrech dominantní první amplituda, neboli otáčková frekvence. Tato amplituda se nachází na frekvenci 48,7 Hz, což je v přepočtu na otáčky cca 2922 ot·min<sup>-1</sup>. Dále se v tomto frekvenčním spektru objevuje amplituda na 292 Hz. Je to přesně šestý násobek otáčkové frekvence a jelikož oběžná kola těchto čerpadel mají šest lopatek jedná se o takzvanou frekvenci od průchodu lopatek. Tato

frekvence bývá u čerpadel často přítomná a ve většině případů nepředstavuje problém pro chod čerpadla.

Hodnoty rychlosti vibrací u čerpadel dva a čtyři také spadají dle normy ČSN ISO 10 816-7 do pásma A, kde se nachází nově přejímané stroje. Ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací od 10 Hz do 1000 Hz je patrná frekvence otáčení na 38,8 Hz a frekvence od průchodu lopatek na 233 Hz. Obě čerpadla mají otáčky motoru regulovány za pomoci frekvenčního měniče a u obou čerpadel je patrný projev těchto měničů ve frekvenčním spektru zrychlení vibrací v rozsahu od 10 Hz do 25 kHz (Obr.46). Dominantní jsou zde amplitudy na dvojnásobcích spínací frekvence měniče otáček, konkrétně na 8 kHz a 16 kHz. Kolem těchto frekvencí jsou namodulované pásma o hodnotě frekvence otáčení (viz Obr.47).

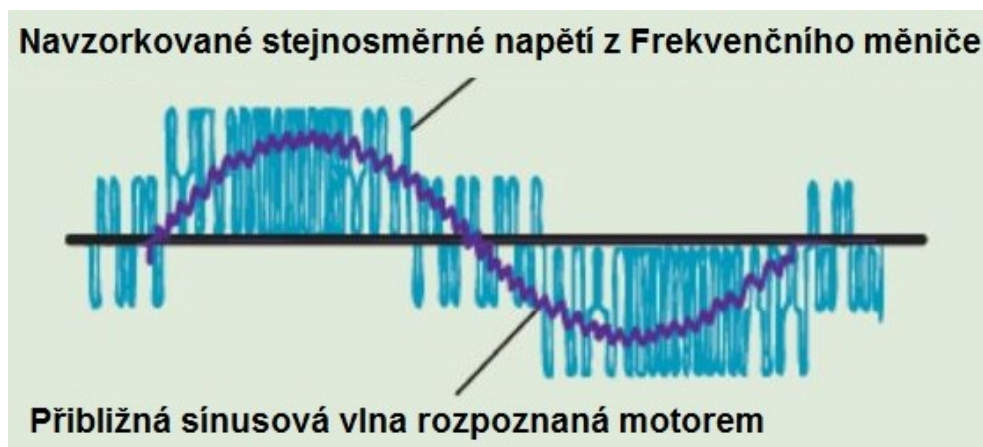


Obr. 46 Projev frekvenčního měniče ve spektru zrychlení vibrací 10-25 000 Hz



Obr. 47 Zoom frekvenčního spektra zrychlení vibrací 10-25 000 Hz

Projev frekvenčních měničů souvisí se samotným principem těchto regulátorů otáček. Princip spočívá v přeměně sinusového (střídavého) signálu ze sítě na stejnosměrné impulsy, díky kterým je indukční motor schopen skládat sinusový signál (viz Obr.48). Výstupní napětí je pak závislé na šířce a modulaci impulsů. Důležitou částí frekvenčních měničů jsou pak výstupní filtry a kondenzátory, které mají za úkol vyhlazení výstupního signálu. Právě absence nebo nízká kvalita těchto, prvků může mít za následek již zmíněný projev ve frekvenčním spektru. Vzniklé rušení od frekvenčního měniče pak může působit na ložisko nadměrné vysokofrekvenční síly. Následkem je přerušení nebo spálení mazacího filmu nebo vznik ložiskových proudů, které ložisko roztaví a znehodnotí. Dále se v obálce objevují harmonické násobky otáčkové frekvence. Tento projev může souviset s už zmiňovaným frekvenčním měničem nebo také může signalizovat nadměrnou vůli v ložiskových domech.



Obr. 48 Základní princip frekvenčních měničů [16]

Poslední tři čerpadla se také dle normy ČSN ISO 10 816-7 pohybují v pásmu vibrací A. Ve frekvenčním spektru rychlosti vibrací od 10 Hz do 1000 Hz se objevuje frekvence otáčení na 20,85 Hz a frekvence od průchodu lopatek na frekvenci 125,25 Hz. V grafu 10 se v bodě L3 u prvního měření objevuje vysoká hodnota rychlosti vibrací, konkrétně  $10,18 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při rozboru frekvenčního spektra bylo zjištěno, že tato vysoká hodnota vibrací byla způsobena vlivem přebuzeného snímače. Tento jev nastává v případě, kdy je snímač vystaven rázu a vzniku elektrického náboje v piezokeramice před začátkem měření. Takto vzniklá hodnota je dle normy neplatná a nedá se dále použít k objektivnímu posouzení technického stavu stroje.

Celkově je technický stav všech sledovaných čerpadel velmi dobrý a jsou schopny bezproblémového provozu. Problémem do budoucna může být tuhost sestavy čerpadel. Jelikož jsou tyto čerpadla umístěna v záchytné vaně, jsou pouze „položena“ na gumových

patkách. Při vzniku budící síly například od poruchy, může začít celá sestava kmitat a znásobit tak následky vzniklých poruch. Jako řešení se nabízí přivaření základu čerpadla k záchytné vaně pro zvýšení celkové tuhosti sestavy.

## 10 CELKOVÝ ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout fungující diagnostický systém pro kontrolu technického stavu sledovaných objektů a zajištění provozuschopnosti celého výrobního segmentu. Pro splnění tohoto cíle byly využity metody technické diagnostiky, konkrétně vibrodiagnostika a termodiagnostika. U části sledovaných strojních zařízení byla využita takzvaná online vibrodiagnostika, která slouží k nepřetržitému sledování vibrací a poskytuje tak podrobnou historii vývoje celkových hodnot. Zbýlá zařízení byla kontrolována pomocí periodického pochůzkového měření vibrací a povrchové teploty.

První část praktické části se zabývala realizací diagnostického systému a nastavení parametrizačního softwaru k nepřetržitému sledování vibrací. Realizace jako taková se týkala výběru typu sensorů, umístění měřicích bodů, seskládání rozváděcích skříní s vyhodnocovacími jednotkami a instalace propojovacích zásuvek se sítí. Dalším krokem bylo nastavení parametrizačního softwaru a samotných sledovaných objektů. Pod pojmem objekty jsou zde myšleny například efektivní hodnota rychlosti vibrací, efektivní hodnota zrychlení vibrací nebo také špičková hodnota zrychlení vibrací v časové oblasti. Dále zde byly nastaveny k jednotlivým objektům limitní hodnoty, průměrování, zpoždění odezvy, filtry a čas měření.

Druhá část se týkala samotného vyhodnocení sledovaných objektů a posouzení jejich technického stavu a provozuschopnosti. Celý výrobní segment je nově vybudovaný a tudíž první naměřená data sloužila k nastavení referenčních hodnot a vytvoření celkového obrazu o stavu těchto strojních zařízení. K zhodnocení byly využity příslušné normy, které posuzují technický stav určitých strojních zařízení.

Dle těchto norem jsou všechny sledované objekty provozuschopné a to bez omezení a odpovídají nově přejímaným zařízením. U většiny těchto zařízení jsou ve frekvenčním spektru patrné pouze frekvence otáčení a frekvence od průchodu lopatek, které mohou například u ventilátorů naznačovat turbulentní proudění. Tato frekvence ale většinou neznamena pro chod ventilátorů a čerpadel nějaké větší problémy. Některé motory mají regulované otáčky za pomoci frekvenčních měničů, a jejich projev ve frekvenčním spektru je patrný. Důvodem projevu frekvenčního měniče mohou být nekvalitní nebo úplně chybějící výstupní filtry a kondenzátory, které mají za úkol vyhladit stejnosměrný signál přiváděný do elektromotoru. Jako problém se také může zdát základ a tuhost sledovaných



čerpadel. Čerpadla jsou umístěna v pojistné záchytné vaně, která má v případě průsaku lázně zachytit alespoň objem jedné z nich. Z tohoto důvodu jsou čerpadla pouze postavena na gumových nohách a nejsou tak nijak spojena se základem. Při vzniku budící síly, například od poruchy, pak může celá sestava začít kmitat a znásobit tak vzniklé ztráty. Jako řešení se zde nabízí například svar mezi vanou a rámem podstavce čerpadla.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Blatovi Ph.D. za potřebné konzultace a profesionální vedení při vypracovávání mé diplomové práce. Dále bych chtěl také poděkovat panu Ing. Petru Šímkovi a panu Ing. Lukáši Heisigovi, Ph.D. za ochotu, trpělivost, cenné rady a poskytnutí podkladových materiálů k vypracování této práce.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BROCH, J.T. Mechanical Vibration and Shock Measurements. Naerum: Brüel & Kjaer, 1984.
- [2] HUSÁK, Miroslav. Mikrosenzory a mikroaktuátory. Praha: Academia, 2008. Gerstner. ISBN isbn:978-80-200-1478-8.
- [3] LYNCH, Jerome P., Aaron PARTRIDGE, Kincho H. LAW, Thomas W. KENNY, Anne S. KIREMIDJIAN a Ed CARRYER. Design of Piezoresistive MEMS-Based Accelerometer for Integration with Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring. 2003, DOI: 10.1061/(ASCE)0893-1321(2003)16:3(108). Dostupné z: <http://wwwpersonal.umich.edu>
- [4] Thermal MEMS Accelerometers: Technology. MEMSIC [online]. © 2014 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.memsic.com/technology/thermalmems.cfm>
- [5] Berry, James E. Use of vibration analysis to detect a variety of machine problems using technical associates'. Technical association of Charlote. Dostupné z: <https://www.technicalassociates.net>
- [7] KREIDL, Marcel. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. ISBN 80-730-0158-6.
- [8] HUSÁK, Miroslav. Akcelerometry [online]. Praha, 2009 [cit. 2012-05-31]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz>
- [9] ACAR, Cenk a Andrei M SHKEL. Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance MEMS accelerometers. Journal of Micromechanics and Microengineering. 2003-09-01. DOI: 10.1088/0960-1317/13/5/315.
- [10] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [11] Interní zdroje nejmenované společnosti.
- [12] Čerpadla. KSB.com [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://products.ksb.com/cs-cz/>
- [13] Ventilátory. HLU.eu [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.hlu.eu/en/home-en/>

- [14] Systémy pro monitorování vibrací a diagnostiku. Ifm.com [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: [https://www.ifm.com/cz/cs/category/070/070\\_010](https://www.ifm.com/cz/cs/category/070/070_010)
- [15] Accelerometers. Handsfordsensors.com [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.hansfordsensors.com/products/industrial-accelerometers/ac/ac-standard-top-entry-accelerometers/>
- [16] Problems VFDs cause and cable types that help solve them. Motion Control Tips [online]. 14.02.2015 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/problems-vfds-cause-cable-types-help-solve/>
- [17] ČSN ISO 20816-1 (011412): Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 1: Obecné pokyny. 2017.
- [18] ČSN ISO 10816-7 (011412): Vibrace - Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech - Část 7: Odstředivá čerpadla pro průmyslová použití včetně měření na rotujících hřídelích. 2010.
- [19] ČSN ISO 14694 (122003): Průmyslové ventilátory - Specifikace kvality vyvážení a úrovní vibrací. 2014.
- [20] ČSN ISO 18434-1 (011465): Monitorování stavu a diagnostika strojů - Termografie - Část 1: Všeobecné postupy. 2009.
- [21] Vlastní zpracování

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Meze pásem rychlosti vibrací na nerotujících částech odstředivých čerpadel o výkonu nad 1 kW [18] .....	48
Tab. 2 Meze pásem hodnocení vibrací pro průmyslové ventilátory [19] .....	49
Tab. 3 Štítkové parametry ventilátoru 1 až 4 .....	50
Tab. 4 Štítkové parametry ventilátoru pro odvod zneutralizovaného vzduchu .....	52
Tab. 5 Poruchové frekvence valivých ložisek .....	52
Tab. 6 Štítkové parametry čerpadla 1 a 3 .....	55
Tab. 7 Poruchové frekvence valivých ložisek .....	55
Tab. 8 Štítkové parametry čerpadla 2 a 4 .....	57
Tab. 9 Poruchové frekvence valivých ložisek .....	57
Tab. 10 Štítkové parametry čerpadla 5, 6 a 7 .....	58
Tab. 11 Poruchové frekvence valivých ložisek .....	59

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Způsoby mechanického namáhání piezokeramiky [1] .....	13
Obr. 2 Piezoelektrický snímač-konfigurace se stříhem [1] .....	13
Obr. 3 Piezoelektrický snímač-konfigurace se stlačením [1] .....	13
Obr. 4 (a)- Popis částí piezoelektrického akcelerometru; (b)-Dimenzování snímače; (c)- Snímek piezoelektrického akcelerometru. [3] .....	15
Obr. 5 Základní uspořádání kapacitního akcelerometru. [7] .....	16
Obr. 6 Hřebenové uspořádání kapacitního akcelerometru. [8] .....	17
Obr. 7 Ukázka realizace MEMS kapacitního akcelerometru. [9] .....	17
Obr. 8 Princip tepelného MEMS akcelerometru. [4] .....	17
Obr. 9 Realizace tepelného snímače vibrací firmou MEMSIC [4] .....	18
Obr. 10 Silová nevyváženost [5] .....	19
Obr. 11 Momentová nevyváženost [5] .....	20
Obr. 12 Dynamická nevyváženost [5] .....	20
Obr. 13 Nevyváženost převislého rotoru [5] .....	21
Obr. 14 Ohnutý hřídel [5] .....	21
Obr. 15 Úhlová nesouosost [5] .....	22
Obr. 16 Paralelní nesouosost [5] .....	22
Obr. 17 Nesouosé ložisko [5] .....	22
Obr. 18 Mechanické uvolnění, typ A, [5] .....	23
Obr. 19 Mechanické uvolnění, typ B, [5] .....	23
Obr. 20 Mechanické uvolnění, typ C, [5] .....	24
Obr. 21 Přidírání rotoru [5] .....	24
Obr. 22 Znázornění rozměrů použitých v rovnicích pro výpočet poruchových frekvencí valivých ložisek [5] .....	25
Obr. 23 Průběh poškození valivého ložiska-ETAPA_1[5] .....	26

Obr. 24 Průběh poškození valivého ložiska-ETAPA_2 [5].....	26
Obr. 25 Průběh poškození valivého ložiska-ETAPA_3, [5].....	27
Obr. 26 Průběh poškození valivého ložiska-ETAPA_4 [5].....	27
Obr. 27 Spektrum se znázorněnou frekvencí od průchodu lopatek [5] .....	28
Obr. 28 Turbulentní proudění [5].....	28
Obr. 29 Kavitační jev [5] .....	29
Obr. 30 Princip metody odrazu; 1 – Termokamera, 2 – Zdroj tepla, 3 – Reflektor, 4 – Měřený objekt [20].....	33
Obr. 31 Princip přímé metody; 1 – termokamera, 2 – zdroj tepla, který objekt odráží do kamery, 3 – měřený .....	34
Obr. 32 Monoblokové čerpadlo Etachrom B, Blokové čerpadlo Etabloc. [12].....	36
Obr. 33 Průřez čerpadla. 1- škrtkící šterbina, 2- výtlačné hrdlo, 3- víko tělesa, 4- hřídel, 5- těleso motoru, 6- sací hrdlo, 7- oběžné kolo, 8- hřídelové těsnění, 9- lucerna pohonu, 10- valivé ložisko na straně čerpadla, 11- valivé ložisko na straně pohonu [12].....	37
Obr. 34 Ventilátor pro odvod vyčištěného vzduchu [13] .....	39
Obr. 35 Prostředí softwaru VES004 – záložka Objects [21] .....	43
Obr. 36 Diagram znázorňující přiblížení hodnoty objektu k naměřené hodnotě [14].....	44
Obr. 37 Zleva vibrační analyzátor[11], MEMS akcelerometr[14], Handsford Sensors akcelerometr [15], Vyhodnocovací jednotka [14]. .....	47
Obr. 38 Průmyslové ventilátory a princip proudění vzduchu ve sušícím zařízení [21].....	49
Obr. 39 Historie vývoje efektivní hodnoty rychlosti vibrací ventilátoru 1 .....	50
Obr. 40 Historie vývoje efektivní hodnoty rychlosti vibrací ventilátoru 2.....	51
Obr. 41 Historie vývoje efektivní hodnoty rychlosti vibrací ventilátoru 3.....	51
Obr. 42 Historie vývoje efektivní hodnoty rychlosti vibrací ventilátoru 4.....	52
Obr. 43 Historie vývoje efektivní hodnoty rychlosti vibrací ventilátoru pro odvod zneutralizovaného vzduchu.....	53
Obr. 44 Obálka zrychlení vibrací v bodě L1 a L2 v horizontálním směru .....	54
Obr. 45 Pasivační linka – zjednodušený layout.....	55

Obr. 46 Projev frekvenčního měniče ve spektru zrychlení vibrací 10-25 000 Hz.....	61
Obr. 47 Zoom frekvenčního spektra zrychlení vibrací 10-25 000 Hz .....	61
Obr. 48 Základní princip frekvenčních měničů [16] .....	62



## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Trend vývoje povrchové teploty ventilátoru 1 až 4 .....	50
Graf 2 Trend vývoje povrchové teploty ventilátoru pro odvod zneutralizovaného vzduchu .....	53
Graf 3 Trend vývoje povrchové teploty čerpadel 1 a 3 .....	56
Graf 4 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 1 .....	56
Graf 5 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 3 .....	56
Graf 6 Trend vývoje povrchové teploty čerpadel 2 a 4 .....	57
Graf 7 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 2 .....	58
Graf 8 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 4 .....	58
Graf 9 Trend vývoje povrchové teploty čerpadel 5, 6 a 7 .....	59
Graf 10 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 5 .....	59
Graf 11 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 6 .....	60
Graf 12 Trend vývoje rychlosti vibrací v horizontálním směru na čerpadle 7 .....	60

## SEZNAM PŘÍLOH

**Příloha A** – tabulky s hodnotami  $v_{\text{RMS}}$  čerpadla 01 a 03; frekvenční spektra rychlosti vibrací od 10 Hz do 1000 Hz čerpadel 01 a 03; termosnímký čerpadel 01 a 03 (měření 1-9).

**Příloha B** – tabulky s hodnotami  $v_{\text{RMS}}$  čerpadla 02 a 04; frekvenční spektra rychlosti vibrací od 10 Hz do 1000 Hz čerpadel 02 a 04; termosnímký čerpadel 02 a 04 (měření 1-9).

**Příloha C** – tabulky s hodnotami  $v_{\text{RMS}}$  čerpadla 05, 06 a 07; frekvenční spektra rychlosti vibrací od 10 Hz do 1000 Hz čerpadel 05, 06 a 07; termosnímký čerpadel 05, 06 a 07 (měření 1-9).

**Příloha D** – tabulka s hodnotami  $v_{\text{RMS}}$  ventilátoru pro odvod zneutralizovaného vzduchu; frekvenční spektrum rychlosti vibrací od 10 Hz do 1000 Hz ventilátoru pro odvod zneutralizovaného vzduchu; termosnímký ventilátoru pro odvod zneutralizovaného vzduchu (měření 1-9).

**Příloha E** – Sledované objekty ventilátorů 01 až 04 kde dni 4.5.2020; frekvenční spektrum rychlosti vibrací ventilátoru 01 až 04 s vyznačením otáčkové frekvence; frekvenční spektrum zrychlení vibrací ventilátoru 01 a 03 s vyznačením frekvence od průchodu lopatek; termosnímký ventilátoru 01 až 04 (měření 1-9).